An aerial photograph showing the ruins of a stone building, likely a glass-making workshop, with a large cross-shaped structure made of rough-hewn stones in the center. The ground is dark and uneven, with some scattered stones and debris.

*Christophe Gerber  
Yvonne Gerber  
Willem B. Stern  
Laetitia Kaiser  
Giacomo Eramo*

# Court, Pâturage de l'Envers

Une verrerie forestière jurassienne  
du début du 18<sup>e</sup> siècle

A 3D architectural rendering of the interior of a glass-making workshop. It shows two large, dome-shaped furnaces (cannettes) built into a stone base. A worker in a blue cap and brown shirt is standing on a wooden platform, using a long pole to handle a glowing, molten glass object within one of the furnaces. Another worker in a yellow shirt is visible in the background. The structure is housed within a wooden frame, possibly a barn or workshop.

## 2 Des matières premières aux productions



# Court, Pâturage de l'Envers

Une verrerie forestière jurassienne du 18<sup>e</sup> siècle

**Volume 2 : Des matières premières aux productions.  
Approches historiques, techniques et archéométriques.**

Christophe Gerber, Yvonne Gerber, Willem B. Stern, Laetitia Kaiser et Giacomo Eramo

---

Avec des contributions de Lara Tremblay, Jonathan Frey et Chris Lucianu



Editeur  
Direction de l'instruction publique du canton de Berne  
Office de la culture  
Service archéologique du canton de Berne, case postale 5233, 3001 Berne

Rédaction  
Christophe Gerber, SAB  
Lara Tremblay, SAB  
Christine Felber, SAB  
Michel Philippe, Paris, France

Traductions  
Christophe Gerber, SAB  
Lara Tremblay, SAB  
Rudolf Zwahlen, SAB  
Regula Gubler, SAB

Conception et mise en page  
Max Stöckli et Eliane Schranz, SAB

Impression  
Druckerei Rub Graf-Lehmann, 3001 Berne  
Printed in Switzerland

Edition, commande  
Verlag Rub Media, case postale, 3001 Berne. buch@rubmedia.ch

© Service archéologique du canton de Berne 2012  
Toute réimpression partielle ou complète de l'ouvrage nécessite une autorisation  
préalable de l'éditeur.

Berne 2012

ISBN 978-3-907663-36-3



# Table des matières

Préface .....	7	3.5 Outils de fabrication du verre (LT) .....	87
Vorwort .....	8	3.5.1 Etat de la question. ....	87
<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>	3.5.2 Production et chaîne opératoire. ....	91
Christophe Gerber		3.5.3 Conclusion .....	94
1.1 Production de verre dans le Jura central: rappel. .	10	<b>4. Archäometrische Analysen der Gläser .....</b>	<b>95</b>
1.2 Présentation générale du site .....	10	Yvonne Gerber und Willem B. Stern	
1.3 Etat de la recherche .....	12	4.1 Waldglas allgemein .....	96
1.4 Objectifs de l'étude .....	13	4.1.1 Einleitung (WBS und YG) .....	96
1.5 Remerciements .....	14	4.1.2 Werkstoff Glas, Definitionen (WBS) .....	97
<b>2. Fabrication du verre .....</b>	<b>17</b>	4.1.3 Zum Herstellungsprozess von	
Christophe Gerber		Kalium-Calcium-Glas. ....	100
2.1 Matières premières. ....	18	4.1.4 Kurzer historischer Abriss (YG). ....	105
2.1.1 Sable .....	18	4.2 Die Glasproduktion von	
2.1.2 Fondants. ....	22	Court, Pâturage de l'Envers. ....	108
2.1.3 Chaux. ....	26	4.2.1 Ausgangslage (YG) .....	108
2.1.4 Groisil. ....	26	4.2.2 Analytik (WBS) .....	111
2.1.5 Matières décolorantes, colorantes et		4.2.3 Statistische Auswertung der	
opacifiantes .....	27	chemischen Analysen (YG) .....	115
2.1.6 Bois. ....	30	4.2.4 Schlussfolgerungen (YG und WBS) .....	142
2.2 Préparation des matières .....	34	4.3 Die Rohmaterialien (WBS) .....	145
2.2.1 Fusion de la composition .....	34	4.3.1 Die Rohmaterialien der Glasherstellung	
2.2.2 Observations archéologiques. ....	35	in Court, Pâturage de l'Envers. ....	145
<b>3. Production de verre à Court,</b>		4.3.2 Holzverbrauch und Glasproduktion .....	150
<b>Pâturage de l'Envers .....</b>	<b>37</b>	4.3.3 Rezepturen zur experimentellen	
Christophe Gerber et Lara Tremblay		Herstellung .....	151
3.1 Introduction (CG) .....	38	4.4 Zusammenfassung/Résumé/Summary .....	157
3.2 Méthodes de collecte .....	38	<b>5. Four de fusion, creusets et pots de cuisson ....</b>	<b>163</b>
3.2.1 Verre. ....	39	Laetitia Kaiser, Giacomo Eramo, Christophe Gerber	
3.2.2 Céramique .....	39	et Jonathan Frey	
3.2.3 Matériaux de construction .....	39	5.1 Principes technologiques de base (GE) .....	164
3.2.4 Métal .....	40	5.2 Matières premières. ....	165
3.3 Traitement, classification et étude des verres ....	40	5.3 Etat de la recherche (LK) .....	167
3.3.1 Verre brut .....	42	5.4 Hypothèses et problématiques (GE) .....	168
3.3.2 Déchets. ....	43	5.5 Stratégie d'échantillonnage .....	169
3.3.3 Débris de verre indéterminés. ....	55	5.5.1 Court, Pâturage de l'Envers. ....	169
3.3.4 Fritte ?. ....	56	5.5.2 Court, Sous les Roches .....	169
3.4 Verres produits. ....	57	5.6 Matériaux (CG et GE) .....	169
3.4.1 Vitrage .....	57	5.6.1 Pierre calcaire .....	174
3.4.2 Verre d'assortiment. ....	75	5.6.2 Grès .....	174
3.4.3 Conclusion .....	82	5.6.3 Sable .....	174
3.4.4 Comparaison avec le site de Court,		5.6.4 Argiles .....	175
Sous les Roches .....	84	5.7 Eléments de construction du four (LK) .....	178
		5.7.1 Introduction à l'analyse .....	178



5.7.2 Briques . . . . .	181	Résumé/Zusammenfassung/Summary (CG) . . . . .	239
5.7.3 Fragments d'ouvreaux et de tuilettes . . . . .	189	Catalogue (LK) . . . . .	245
5.7.4 Fragments de voûte . . . . .	192	Annexe 1, Précis d'analyse statistique (CL) . . . . .	261
5.7.5 Eléments divers . . . . .	193	Annex 2, Chemische Analysen (Haupt- und Neben-	
5.7.6 Données archéométriques (GE) . . . . .	194	komponenten sowie Spurenelemente) (YG und WBS) .	266
5.8 Creusets (LK) . . . . .	194	Annexe 3, Archéométrie: techniques d'analyse des	
5.8.1 Introduction à l'analyse. . . . .	194	céramiques associées aux fours verriers (GE) . . . . .	278
5.8.2 Grands creusets. . . . .	197	Glossaire/Glossar/Glossary. . . . .	281
5.8.3 Petits creusets . . . . .	208	Bibliographie . . . . .	291
5.8.4 Emploi et durée de vie des creusets		Crédit iconographique . . . . .	300
(LK et CG) . . . . .	209	Adresses des auteurs . . . . .	301
5.9 La céramique à recuire (JF) . . . . .	211		
5.9.1 Introduction . . . . .	211		
5.9.2 Etat de la question. . . . .	211		
5.9.3 Inventaire de la céramique. . . . .	214		
5.9.4 Perspectives de recherche. . . . .	218		
5.9.5 Données archéométriques (GE) . . . . .	219		
<b>6. Four: synthèse générale . . . . .</b>	<b>223</b>		
Laetitia Kaiser, Giacomo Eramo et Christophe Gerber			
6.1 Données archéologiques (LK) . . . . .	224		
6.2 Données archéométriques (GE) . . . . .	225		
6.3 Aspects pyro-technologiques . . . . .	227		
6.4 Modes de construction et typologie			
(LK et CG) . . . . .	229		
6.5 Reconstitution. . . . .	230		
6.6 Places de travail et gestes (CG). . . . .	233		
6.6.1 Sur l'estrade . . . . .	233		
6.6.2 Au banc . . . . .	236		
6.6.3 Estimation de la production . . . . .	237		



## Préface

C'est dans les délais impartis que nous avons le plaisir de soumettre au public intéressé le second volume consacré aux résultats archéologiques des fouilles de sauvetage entreprises à l'emplacement de l'ancienne verrerie de Court, Pâturage de l'Envers. Publier de manière si exhaustive, à un moment où le Gouvernement se voit contraint d'arrêter un moratoire sur les dépenses? Un luxe? Pourquoi ne pas se contenter de « jouer les pompiers », c'est à dire de se concentrer sur les interventions d'urgence et les fouilles de sauvetage? Il serait possible de répondre: « La Confédération couvre les coûts principaux, puisqu'il s'agit d'une fouille sur le tracé de la route nationale A16; alors, profitons-en, en appliquant le principe du « casseur-payeur ». Une argumentation pareille est inadmissible puisqu'il s'agit d'un financement public, qu'il soit fédéral ou cantonal. Une présentation plus détaillée se justifie par la durée de vie extraordinairement brève de la verrerie: fondée en 1699, elle fut abandonnée en 1714. Le lieu retourna ensuite à son état forestier naturel et le sol conserva ainsi un pan d'histoire culturelle que les décapages d'humus nécessaires à l'implantation du site d'entreposage de matériaux de la Transjurane menaçaient de détruire.

Pour l'archéologie, il s'agit d'une véritable situation de laboratoire. Quasi aucune contamination due à des interventions postérieures, comme cela est généralement le cas dans un espace industriel, où presque chaque génération adapte la production, voire change de type de produit. Il en va tout autrement à Court où, grâce à la brièveté de l'exploitation de la verrerie, toutes les traces se rapportent à une unique phase d'exploitation.

Ainsi que nous le savons aujourd'hui, cette situation s'avère unique bien au-delà de nos frontières et constitue la raison qui justifie pleinement une présentation exhaustive des trouvailles – fut-ce même en temps de ressources limitées.

Après avoir présenté les principaux vestiges du site dans le premier volume, Christophe Gerber est ici secondé par des spécialistes, notamment en géologie et en archéométrie, des universités de Bâle, Fribourg et Zurich. C'est bien volontiers que je me joins aux remerciements du chapitre introductif, qui énumèrent tous les collaborateurs du projet. Je souhaite mentionner en particulier les professeurs responsables des instituts concernés: Willem B. Stern, Bâle, Marino Magetti, Fribourg et Georges Descoeurdes, Zurich. Leur initiative et leur enthousiasme ont contribué à la mise en place d'un projet d'étude interdisciplinaire, dont nous pouvons présenter ici les résultats. L'acquisition de nouvelles connaissances du plus grand intérêt sont envisageables même en temps de restrictions. Ce qui reste crucial, ce sont les acteurs et leur volonté de pratiquer une recherche judicieuse avec efficacité. Et, afin que la recherche ne reste pas enfermée dans sa tour d'ivoire, la publication s'avère nécessaire. A cet égard, je ne suis pas peu fier que nous puissions présenter les résultats sous forme d'une monographie du Service archéologique, dans notre série de l'Office de la culture de la Direction de l'instruction publique du canton de Berne, et que les auteurs, accompagnés par nos collaborateurs responsables de la réalisation et de la production, aient trouvé une mise en page attractive qui invite aussi les non-spécialistes à se plonger dans le monde de la fabrication du verre au début du 18<sup>e</sup> siècle. Je vous souhaite à tous de passionnants moments de lecture.

*Berne, automne 2012*

*Daniel Gutscher  
archéologue cantonal*

## Vorwort

Plangemäss dürfen wir dem interessierten Publikum den zweiten Band über die archäologischen Ergebnisse der Rettungsgrabungen am Ort der ehemaligen Glashütte von Court, Pâturage de l'Envers überreichen. So ausführlich publizieren in einer Zeit, welche die Regierung zwingt, Ausgabenmoratorien zu beschliessen? Ein Luxus? Warum sich nicht auf die «Feuerwehraktionen», das heisst auf die Not- und Rettungsgrabungen konzentrieren? Eine mögliche Antwort: «Der Bund zahlt die Hauptkosten, handelt es sich doch um eine Grabung im Trasse der Nationalstrasse, der A16; also greifen wir zu, gilt ja das Verursacherprinzip». Doch so zu argumentieren, ist unstatthaft, ist doch das genauso Steuergeld, nur statt bernischem eidgenössisches. Der Grund zur breiteren Vorlage liegt in der ungewöhnlich kurzen Lebensdauer der Glashütte: 1699 gegründet, wurde sie bereits 1714 wieder aufgegeben. Der Platz verwilderte und verwaldete, und der Boden bewahrte damit ein Stück Kulturgeschichte, welches die bevorstehende völlige Abhumisierung für die Materialdeponie der Transjurane zu vernichten drohte.

Für die Archäologie bedeutet dies eine geradezu labormässige Situation. Kaum «Kontaminierungen» durch jüngere Eingriffe, wie dies normalerweise in einem industriellen Areal der Fall ist, wo fast jede Generation die Produktion anpasst oder gar das Grundprodukt ändert. Anders in Court, wo sich dank der kurzen Laufzeit der Hütte alle Spuren auf die einzige Produktion konzentrieren.

Diese Ausgangslage ist, wie wir heute wissen, weit über unsere Landesgrenzen hinaus einzigartig, und dies ist der Grund, weshalb eine breitere Materialvorlage mehr als gerechtfertigt ist – eben auch in einer Zeit knapper Ressourcen.

Nachdem im ersten Band die Fundstelle mit den wichtigsten Befunden vorgestellt wurde, kommen jetzt neben dem Hauptverantwortlichen Christophe Gerber Spezialistinnen und Spezialisten insbesondere der Geologie und Archäometrie der Universitäten Basel, Zürich und Fribourg zum Zuge. Ich schliesse mich gerne dem Dank im Einleitungskapitel an; dort sind die Namen aller Mitarbeitenden genannt. Speziell erwähnen möchte ich die leitenden Professoren der beteiligten Institute: Willem B. Stern, Basel, Marino Magetti, Fribourg, und Georges Descoedres, Zürich. Ihrer Initiative und Begeisterungsfähigkeit bedurfte es, dass ein interdisziplinäres Auswertungsprojekt zustande kam, dessen Resultate wir hier vorstellen dürfen. Hervorragende neue Erkenntnisse können auch in einer Zeit knapper Ressourcen gewonnen werden. Entscheidend sind noch immer die Personen und deren Wille, sinnvolle Forschung effizient zu betreiben. Damit jedoch die Forschung nicht im Elfenbeinturm bleibt, braucht es die Veröffentlichung, und da gestehe ich gerne, dass ich nicht wenig stolz bin, dass wir die Ergebnisse als Monografie des Archäologischen Dienstes in unserer Reihe des Amtes für Kultur der Erziehungsdirektion des Kantons Bern vorlegen dürfen und dass alle Autorinnen und Autoren sowie unsere Mitarbeitenden der Herstellung und Produktion eine Darstellungsweise gefunden haben, die anspricht und auch Nichtfachspezialisten Lust zum Eintauchen in die Materie der barocken Glasherstellung gibt. Ihnen allen wünsche ich bei der Lektüre viele spannende Momente.

*Bern, im Herbst 2012*

*Daniel Gutscher  
Kantonsarchäologe*



# 1. Introduction

Christophe Gerber

---



Le présent ouvrage constitue le second volume de la monographie consacrée au site verrier du Pâturage de l'Envers, fouillé entre 2000 et 2004 dans le cadre des travaux autoroutiers de l'A16 Transjurane. En guise d'introduction, nous rappellerons quelques éléments importants développés dans le premier volume<sup>1</sup> et nécessaires à la compréhension générale du site, avant d'aborder les aspects plus spécifiquement techniques et typologiques de la fabrication.

## 1.1 Production de verre dans le Jura central : rappel

Dans l'état actuel des connaissances basées sur des sources historiques, la production de verre jurassienne semble se développer à partir du dernier quart du 14<sup>e</sup> siècle dans la région de La Heutte, puis dans la première moitié du 15<sup>e</sup> siècle autour de Balsthal SO, dans le canton de Soleure<sup>2</sup>. On ne connaît rien des conditions qui président à l'installation de ces verriers ni des produits qui sortent des ateliers. En 1480, les souffleurs soleurois sont organisés en confrérie et se placent sous la protection de sainte Agathe. Ces deux foyers pourraient être à l'origine de la fabrication du verre dans le Jura central, quoique la filiation ne soit pas évidente à démontrer au travers des sources disponibles.

Néanmoins, au fil des siècles, de nouvelles verreries voient le jour et d'autres disparaissent, essaimant jusque dans la vallée du Doubs et le Laufonnais. Des verriers de Forêt-Noire sont souvent à l'origine de ces fondations. Confrontés à des difficultés d'exploitation dans leur région, ils cherchent à s'établir dans de nouveaux espaces. A ce titre, la région jurassienne, riche en forêts peu exploitées, aiguise leur appétit. Dès la seconde moitié du 17<sup>e</sup> siècle, Court connaît quatre établissements verriers successifs ; le dernier s'éteindra vers 1727. Ces différents ateliers produisent un vaste assortiment de verre et ne semblent se spécialiser que tardivement, au plus tôt vers la fin du 18<sup>e</sup> siècle, comme la verrerie du Bief d'Etoz qui se consacre principalement à la fabrication de verre plat produit à partir de manchon soufflé.<sup>3</sup>

## 1.2 Présentation générale du site

La verrerie du Pâturage de l'Envers a livré une bonne partie de ses secrets, grâce aux fouilles entreprises entre 2000 et 2004. La description détaillée des vestiges mis au jour est à découvrir dans le premier volume publié en 2010 : le lecteur s'y référera. Il nous apparaît toutefois utile de rappeler ici très brièvement les principales découvertes. Autour de la grande halle en bois qui définit le cœur du hameau verrier, gravitaient les habitations qui abritaient les familles des souffleurs et des ouvriers actifs sur le site (fig. 1). Au centre de la halle se dressait le four de fusion percé de dix ouvertures. Deux estrades en bois bordaient les côtés nord et sud du four et constituaient l'espace de travail principal des souffleurs. Deux petits fours rectangulaires accolés, destinés à la cuisson des creusets et à la préparation des matières, flanquaient la paroi orientale de la halle. Dans l'angle sud-oriental de cette dernière, quelques aménagements et des strates archéologiques riches en sable suggéraient le stockage des matières primaires (sable et peut-être groisil). Parmi les différents crassiers mis en évidence autour de la halle, le principal se développait à l'ouest. Outre la halle, un second bâtiment, nettement plus petit, complétait l'infrastructure de production. Il s'agissait d'un atelier à étendre le verre, que nous avons appelé étenderie. Son implantation à proximité de l'habitation 3 laisse supposer qu'il s'agissait d'une installation privée. En effet, le contrat d'amodiation, signé par sept verriers et une veuve de souffleur, ne mentionne pas ce bâtiment comme propriété commune. Autour de la halle s'étendait le hameau, dont seuls quatre bâtiments ont été mis au jour, ce qui est insuffisant pour abriter l'ensemble des familles établies sur le site, que nous pouvons estimer à une bonne soixantaine. Les habitations étaient réalisées en madrier ou en pan de bois et reposaient sur des blocs calcaires ou des murs bahuts ; la cave maçonnée à sec constituait la seule pièce excavée. L'alimentation en eau du hameau était garantie par un captage de source réalisé à proximité ; l'eau était acheminée au moyen de tuyaux de bois jusqu'à une fontaine (secteur A, zone 8).

1 Gerber 2010.

2 Keller 2006, 471-472 ; Schwab 1927, 409-420 ; Gerber 2010, 24-26.

3 Michel 1989, 75-76.





231 900

### 1.3 Etat de la recherche

En Europe occidentale, les recherches archéologiques menées sur les ateliers verriers se sont développées surtout à partir des années 1970 et se sont focalisées sur les fours et les productions de l'Antiquité, avant de s'étendre aux ateliers médiévaux et modernes. Ces travaux restent fortement axés sur la localisation et l'identification des fours et des aspects purement typologiques de la production. En archéologie verrière médiévale, l'exploration des zones périphériques, de la halle aux annexes, en passant par l'habitat verrier, n'intervint que rarement, peut-être par manque de curiosité et de questionnement archéologique, mais sans doute aussi en raison de moyens financiers insuffisants. A ce titre, la fouille de l'atelier de Claret, La Seube (FR), au milieu des années 1960, constitua assurément une exception, puisqu'elle incluait un large espace périphérique dédié notamment à l'habitation<sup>4</sup>. Quoique cette opération méritât d'être mieux publiée, Nicole Lambert a su en offrir une synthèse intégrant également une partie du mobilier céramique et métallique. Près de 20 ans plus tard, une opération montée de bric et de broc au départ allait déboucher sur la découverte du site verrier de Niemetal, Bramwald, dans le district de Göttingen (DE). Hans-Georg Stephan en a publié les principaux résultats dans différents articles. Il fut un des pionniers dans l'étude spécifique des creusets et des éléments de four; on regrettera seulement l'absence d'analyses minéralogiques<sup>5</sup> qui auraient permis de préciser leur composition. Entre 1992 et 1999, la fouille-école menée par l'Institut für Ur- und Frühgeschichte und Archäologie des Mittelalters de l'Université de Tübingen (DE), a débouché sur une remarquable publication en 2004<sup>6</sup>. Quoique centrée sur le cœur de la halle verrière, soit le four de fusion et trois fours annexes, cette étude a fait l'objet d'une approche résolument novatrice. Sören Frommer et Aline Kottmann ont cherché à appliquer la méthode statistique du partitionnement des données pour dégager des groupes de référence, dont ils ont observé la distribution spatiale. Ce procédé a permis de démontrer des processus opératoires et d'interpréter des structures relevant notamment de la production de verre plat.

Aux trois études monographiques énumérées ci-dessus, s'ajoutent évidemment une multitude d'autres contributions, dont l'inventaire n'aurait ici que peu d'intérêt. Citons tout de même quelques acteurs incontournables de la recherche verrière récente, toutes époques confondues: Eva Černá, David Crossley, Danièle Foy, Heinz Horat, François Jannin, Christian Leiber, Heikki Matiskainen, Marie-Dominique Nenna, Jennifer Price, Hans-Georg Stephan, Peter Steppuhn et Kinga Tarcsay<sup>7</sup>. Depuis quelques années, la recherche européenne s'intéresse aussi aux verreries post-médiévales fondées grosso modo entre le milieu du 16<sup>e</sup> et le 18<sup>e</sup> siècle. Cette période couvre toute une série de mutations dans l'industrie verrière, tant au niveau technique que technologique. Nous pensons aux fouilles entreprises à Broumy (CZ)<sup>8</sup>, à Londres (GB)<sup>9</sup> et plus récemment sur les ateliers languedociens de Peyremoutou et Candesoubre (FR)<sup>10</sup>. Au nord des Alpes, la Suisse fait figure de pionnière dans la fouille de trois sites des 18<sup>e</sup>-19<sup>e</sup> siècles: Flühli LU, dont l'étude exhaustive reste à faire, Rebeuvelier JU et Court BE<sup>11</sup>.

Enfin, il convient encore de mentionner l'étude spécifique de Verena Kaufmann<sup>12</sup> consacrée aux rejets d'un atelier de vitrier non localisé de Bad Windsheim (DE) abandonné peu avant 1500. L'important corpus constitué principalement de verre au manchon comporte aussi de nombreux débris découlant du grésage des carreaux.

Les thèmes de la mise en œuvre des matières premières et de la technologie verrière connaissent un regain d'intérêt, suite notamment au développement des analyses physico-chimiques lancées par deux précurseurs en la matière: William E. S. Turner et Robert H. Brill. En effet, dès les années 1980, l'approche archéométrique se systématisait, si bien que les analyses de verres archéologiques se généralisèrent. On citera à cet égard les travaux de Karl-Hans Wedepohl en Allemagne, de Bernard Gratuze en France, James W. Smedley et Caroline M. Jackson en Grande-Bretagne, mais aussi de Willem B. Stern qui fut l'instigateur de ce type d'analyses en Suisse, sur des productions verrières locales<sup>13</sup>.

Initialement, les chercheurs avaient l'espoir de pouvoir identifier des lieux de production ou des aires de diffusion grâce aux seules

4 Lambert 1972, 77-116; Lambert 1982/83, 177-244.

5 Stephan 1988/89, 123-154; Stephan/Wedepohl/Hartmann 1993, 89-123; Stephan 1998, 107-140.

6 Frommer/Kottmann 2004.

7 Leurs travaux principaux étant aisé à trouver grâce à l'internet, nous renonçons ici à les énumérer.

8 Žegklitz 2007, 145-180.

9 Tyler/Willmott 2005.

10 Foy/Averous/Bourrel 1983, 93-103; travaux d'Isabelle Commandré, dont une thèse en préparation.

11 Flühli: Horat 1986, 3-45. Rebeuvelier: Bélet-Gonda/Evéquoz/Eramo 2007, 312-320; la publication du site est prévue en 2013. Court: Gerber 2010; publication prévue en quatre volumes.

12 Kaufmann 2010.

13 Par exemple: Wedepohl 2003; Gratuze 1994; Stern 1991, Stern/Gerber 2004. Voir aussi note 14.

analyses chimiques des verres, sur la base de marqueurs spécifiques, par exemple d'éléments rares. La grande difficulté résidait dans la désignation même de ces marqueurs. Si cette méthode n'a pas apporté les résultats absolus escomptés, c'était surtout en raison de la difficulté d'identifier et de localiser les gisements de matières premières exploités, en particulier les sables. A cela s'ajoutait une certaine méconnaissance des fondants utilisés, importés ou d'origine locale, dont la composition chimique échappait au chercheur, mais influait sur celle du verre. La question des fondants occupe les chercheurs depuis des décennies<sup>14</sup>, le but étant de préciser le moment et les raisons de l'introduction de la cendre végétale potassique, obtenue à partir de végétaux locaux en lieu et place de la cendre sodique maritime importée jusque-là. Les plus anciens témoignages de l'usage de cendres de bois potassiques remonteraient aux 9<sup>e</sup>-10<sup>e</sup> siècles, comme en témoignent certains sites allemands de Rhénanie du Nord et de Hesse<sup>15</sup>. S'agit-il d'une simple évolution technologique ? Faut-il plutôt y voir l'adaptation d'un processus de production en raison de contraintes économiques ou politiques ? Jusqu'au 16<sup>e</sup> siècle, les fours ne paraissent pas subir de modifications significatives : le modèle en forme de ruche, hérité du monde méditerranéen et encore décrit par Agricola, perdure, alors qu'un four d'un autre type, complété d'une arche à recuire latérale, essaima depuis la Bohême. L'introduction du fondant potassique s'expliquerait en partie par la difficulté croissante d'approvisionnement en fondant sodique et par une volonté de s'affranchir de réseaux commerciaux moins stables ou devenus peut-être trop onéreux. Les analyses chimiques ont permis de caractériser les fondants utilisés et mis en évidence les grandes variations régionales des compositions, ce qui complique non seulement l'identification des matières premières utilisées, mais aussi la localisation des sites de production.

Si l'Allemagne, la France et la Grande-Bretagne restent aujourd'hui encore les meneurs incontestés de la recherche en archéologie du verre, il serait souhaitable d'élargir quelque peu les champs d'investigation. L'organisation spatiale de ces collectivités verrières, les réalités économique et sociale qui pourraient transparaître dans le mobilier non vitreux, com-

plèteraient de manière bienvenue, surtout en l'absence d'archive, l'approche traditionnelle technocentriste et typologique des ateliers verriers. Trop d'incertitudes, de demi-vérités ou d'idées préconçues circulent à propos des verriers et de leur statut social. Leur activité, si elle génère des produits qu'ils écoulent ou font écouler par des marchands ambulants, ne les enrichit pas systématiquement. Ces « brasseurs » d'argent ont des dépenses fixes inhérentes à leur métier : achat de fournitures et de matières premières, par exemple. Tous ne sont pas de bons gestionnaires. Ces différents aspects se reflètent-ils dans leurs habitudes alimentaires, dans leur mode de vie ? L'archéologie ne serait-elle pas en mesure de livrer des éléments de réponse ou au moins un éclairage renouvelé sur ces aspects précis. C'est une partie de ce défi que l'équipe pluridisciplinaire chargée de l'étude du site de Pâturage de l'Envers a tenté de relever.

## 1.4 Objectifs de l'étude

Le présent volume se propose d'aborder de manière détaillée un certain nombre de thèmes effleurés dans le premier tome. Précédée d'un bref volet introductif, la première partie de l'ouvrage concerne la présentation et l'étude des matières premières nécessaires à la fabrication du verre, soit le sable, les fondants et le bois (voir chap. 2). Quoique le site du Pâturage de l'Envers se trouve en pays calcaire, des gisements de sable vitrifiable existent dans la région de Court et dans le Petit-Val ; certains ont même été remis en exploitation au 20<sup>e</sup> siècle. Ces sablières ont été recensées et retrouvées pour une bonne part ; quelques-unes ont fait l'objet d'un échantillonnage et d'analyses dans le but de déterminer leurs caractéristiques propres avec l'idée sous-jacente de préciser la provenance du sable utilisé par les verriers de Court. La question des fondants est plus complexe à aborder, car ces derniers ne laissent pas de véritables traces archéologiques et ne sont perceptibles qu'au travers de la composition chimique du verre, si bien que seules des analyses spécifiques permettent de préciser ces apports. La question du bois en tant que combustible, mais aussi en tant que fournisseur d'un fondant potassique classique, la

<sup>14</sup> On mentionnera les travaux précurseurs de William Ernest Stephen Turner : Turner 1956a et Turner 1956b ; plus récemment de Smedley et Jackson : Smedley/Jackson 2002 et Jackson/Smedley 2004 ; de Robert H. Brill : Brill 1999 et de Karl-Heinz Wedepohl : Wedepohl 2001, pour ne citer qu'eux.

<sup>15</sup> Wedepohl 2003, 85-95.



endre, est aussi évoquée dans ce chapitre. Le chapitre 3 aborde les aspects spécifiques de la production et débute par la présentation des méthodes de prélèvement, de traitement et de classification des 59 690 débris de verre collectés. L'identification des déchets, en particulier des meules, et leur quantification constituent une première approche quantitative des qualités de verres réalisés. L'éventail des produits soufflés par ces verriers constitue un autre aspect remarquable dans la mesure où nous ne connaissions à peu près rien de la production verrière jurassienne de la fin du 17<sup>e</sup> et du début du 18<sup>e</sup> siècle. La gobeletterie fine, quoiqu'en qualité commune (couleur vert pâle), constituait un des pôles importants de la production de notre verrerie, au côté du verre plat (cive, carreau et verre en calotte). En outre, le témoignage d'une production de verre filigrané, quoiqu'assez confidentielle, souligne encore la variété de ce complexe. L'outillage verrier, parent pauvre des publications consacrées au verre, est présenté de manière condensée ici, mais fait l'objet d'une étude détaillée dans le quatrième volume de la série. Le chapitre 4 est consacré au vaste programme d'analyses développé avec Willem B. Stern, directeur du Labor für analytische Geochemie, dépendant du Mineralogisch-Petrographisch Institut de l'Université de Bâle. A notre connaissance, c'est la première fois qu'un échantillonnage aussi vaste est analysé dans le cadre d'un unique site verrier des Temps modernes. Les résultats sont probants et ont permis aux chercheurs bâlois de mettre en évidence deux principaux groupes de verre de type calco-potassique. A chacun correspond une composition ou recette faisant appel à une qualité de fondant spécifique. Les résultats de ces analyses sont présentés en détail dans le chapitre 4<sup>16</sup>. La cinquième section s'attache à identifier et décrire les principaux éléments constitutifs du four ayant pu être distingués au sein des débris collectés : briques, tuilettes, fragments de voûte. Elle y intègre les céramiques techniques que sont les creusets et les pots à recuire. Ces derniers, très rarement traités dans la littérature spécialisée, si bien que leur existence même en est méconnue, font l'objet d'une étude détaillée dans le cadre d'une thèse<sup>17</sup> ; leur présentation exhaustive intègre le volume 3 de la série consacré aux céramiques. Les résultats archéométriques ob-

tenus par Giacomo Eramo sur les réfractaires et les terres cuites, déjà largement publiés<sup>18</sup>, ne sont ici que partiellement repris et intégrés au sein des chapitres concernés. Enfin, la sixième section confronte et synthétise l'ensemble des données archéologiques, archéométriques et technologiques dans le but de comprendre le fonctionnement du four et les interactions entre les différents éléments qui le composent. L'étude comparative avec d'autres installations connues, généralement plus récentes, a permis de proposer une reconstitution graphique tridimensionnelle virtuelle du four du Pâturage de l'Envers.

## 1.5 Remerciements

Que de temps s'est écoulé depuis le premier coup de pioche... Ce projet d'étude a progressivement débuté en 2005. Rapidement, au gré des analyses et des découvertes, de nouvelles questions se posaient aux chercheurs. La recherche prit de l'ampleur au point que le fractionnement de la publication en différents volumes est vite apparu comme une évidence inéluctable. Il n'a pas toujours été aisé de définir des chapitres aux frontières nettes, les problématiques des étapes de production et de l'usage des outils et récipients verriers étant intimement liées les unes aux autres. Fallait-il traiter telle catégorie de matériel dans le second plutôt que dans l'ultime volume ? Voilà une question qui s'est souvent posée et qui a impliqué des choix parfois douloureux.

Ce second volume est le fruit d'un travail interdisciplinaire qui a regroupé des archéologues et des géologues versés dans l'archéométrie. Les contacts pris avec les instituts universitaires bâlois et fribourgeois, encore durant les premières phases de fouille, ont rapidement débouché sur des projets concrets, tant l'enthousiasme et l'intérêt suscités par ces travaux étaient grands. Je profite à cet égard de remercier très chaleureusement les professeurs Willem B. Stern et Marino Maggetti pour leur engagement dès les premières heures ou presque dans ce projet. Il convient naturellement d'y joindre leur chercheur associé respectif Yvonne Gerber et Giacomo Eramo, qui ont réalisé un travail scientifique rigoureux et de longue haleine méritant toute ma gratitude.

16 Ecrite en langue allemande, cette contribution scientifique n'a volontairement pas fait l'objet d'une traduction. Néanmoins, les lecteurs trouveront un résumé en français et en anglais.

17 Jonathan Frey, Kunsthistorisches Institut der Universität Zürich, sous la direction du professeur Georges Descoedres.

18 Eramo 2005b.

L'étude des corpus de matériel aurait été compromise sans le laborieux travail de nettoyage, d'inventorisation et de remontage effectué par Nicolas Stork, Stéphane Froidevaux, Daniel Marchand, Christof Blaser ainsi que les restauratrices Frédéric Tissier et Regula Wälti ; je les en remercie sincèrement. Un grand merci à René Bacher pour son soutien précieux dans l'élaboration des différentes bases de données, en particulier dans la création des masques de saisie. Je suis redevable à Nicolas Stork qui, en véritable bénédictin, a compulsé la littérature géologique très disparate relative au Sidérolithique afin de dresser, à des fins cartographiques, l'inventaire des sites d'extraction de sables siliceux et de terres réfractaires. Ma sympathie va à Laetitia Kaiser qui s'est attelée avec abnégation à l'étude du corpus des matériaux de construction et des creusets, avant de réorienter sa carrière. Ma gratitude va aussi à Jonathan Frey qui a accepté de dresser un aperçu des fascinants résultats que livre l'étude académique des céramiques à cuire, qu'il mène dans le cadre de sa thèse de doctorat. La communauté scientifique ainsi que le grand public se réjouit de découvrir, dans le troisième volume<sup>19</sup>, la totalité des résultats ainsi que le précieux ensemble de céramique domestique. Je tire un grand coup de chapeau à la section Etude archéologique qui, comme d'accoutumée, a réalisé un travail magnifique : Daniel Marchand et Max Stöckli pour les reconsti-

tutions 3D, Michelle Frey, Cornelia Schlup, Anna Schmocker, pour les graphiques et dessins d'objets, Badri Redha pour les photographies et Eliane Schranz pour la mise en page.

La relecture des textes en français a été assurée par Michel Philippe, membre fondateur de l'Association Verre et Histoire, qui a déjà accompagné la sortie du premier volume, et Lara Tremblay, qui étudie le corpus métallique du site. La contribution archéométrique en allemand a été relue par Gisela Thierrin-Michael. Qu'ils soient ici remerciés pour la diligence avec laquelle ils ont assumé cette tâche exigeante.

La parution dans les délais de cet ouvrage doit beaucoup à Christine Felber qui a encadré ce projet avec élan et rigueur, n'hésitant pas à poser son œil aiguisé de rédactrice accomplie. Grâce à elle l'ouvrage a gagné en clarté et en qualité.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à Daniel Gutscher, archéologue cantonal, qui a toujours cru et soutenu avec conviction ce projet d'envergure.

Enfin et pour conclure, il m'est agréable d'adresser des remerciements appuyés à l'Office fédéral des routes, dont l'engagement financier a permis la fouille et l'étude du site verrier, et à l'Office des ponts et chaussées du canton de Berne en charge de l'exécution du projet autoroutier.

19 Frey (à paraître).





## 2. Fabrication du verre

Christophe Gerber

---



L'implantation d'une verrerie dépend de différents facteurs : le site doit bénéficier d'un accès aisé aux matières premières nécessaires à la construction et au fonctionnement des fours (pierre, terre réfractaire, combustible), d'une part, mais aussi à celles entrant dans la composition du verre (sable, fondant). Jusqu'au milieu du 19<sup>e</sup> siècle, le combustible constitue l'élément déterminant dans le choix du site ; ce fut souvent le bois, comme en Suisse, mais aussi, dès le 17<sup>e</sup> siècle, le charbon de terre selon les régions. L'accessibilité du site de production n'a joué un rôle que plus tardivement, vers la fin du 18<sup>e</sup> siècle, du moins dans nos régions montagneuses. On peut s'étonner de la localisation de ces verreries installées dans des endroits retirés et isolés, souvent à flanc de montagne, à l'image des établissements de La Heutte, Péry ou Court<sup>20</sup>. Mais le bois constituait souvent l'élément décisif dans le choix d'un site. En effet, la forêt livre non seulement le combustible mais aussi le fondant nécessaire à la fusion du sable vitrifiable. Le fondant le plus commun était tiré de la cendre de bois : on l'obtenait soit par combustion directe, soit par collecte auprès des ménages. L'importation de fondants de meilleure qualité, généralement d'origine chimique, ne devint véritablement rentable qu'avec le développement des réseaux de voies de communication, en particulier les routes, puis le chemin de fer.

## 2.1 Matières premières

A la fin du 17<sup>e</sup> siècle, la fabrication du verre relevait encore en grande partie de la tradition médiévale et se déroulait dans des ateliers de dimensions plutôt modestes, localisés en forêt. Certains sites de production, généralement au bénéfice de soutiens royaux ou princiers, se sont développés, atteignant la taille de véritables manufactures. Si les fours ont connu une certaine évolution dans leur forme, ils sont surtout devenus plus performants. Dans le même temps, depuis l'introduction généralisée de la cendre végétale potassique locale, les compositions verrières sont restées très semblables, les composants n'ayant que peu varié. Comme ces derniers sont à cette époque généralement d'origine naturelle, il est inévitable qu'ils comportent des impuretés qui sont alors

introduites dans la composition. Les deux ingrédients principaux nécessaires sont le sable et le fondant, qui sont également vecteurs d'impuretés. La qualité variable du sable nécessite souvent un lavage préalable, car la présence, à l'état naturel, d'oxydes métalliques dans les ingrédients peut engendrer des effets colorants indésirables. Les verriers parviennent à les neutraliser ou à les corriger par l'ajout d'oxydes ou de sels métalliques spécifiques. Certaines impuretés contenues dans les ingrédients de base, en particulier la cendre de bois, ont un effet bénéfique, comme le carbonate de calcium qui, transformé en oxyde, devient un stabilisant puissant<sup>21</sup>.

### 2.1.1 Sable

Dans l'arc jurassien, il existe deux principaux types de sable : ceux qui participent à la composition des roches sédimentaires des séries molassiques du Tertiaire, et ceux, moins fréquents et fruits d'une altération intense, qui comblent des poches karstiques plus ou moins vastes ou forment à l'occasion des lits discontinus. Si le premier n'a fait l'objet d'aucune exploitation particulière, hormis pour de la pierre de construction dans le cas de certains grès, le second, rattaché au faciès géologique du Sidérolithique, a été exploité au plus tard dès le Moyen Âge.

#### 2.1.1.1 Sable sidérolithique

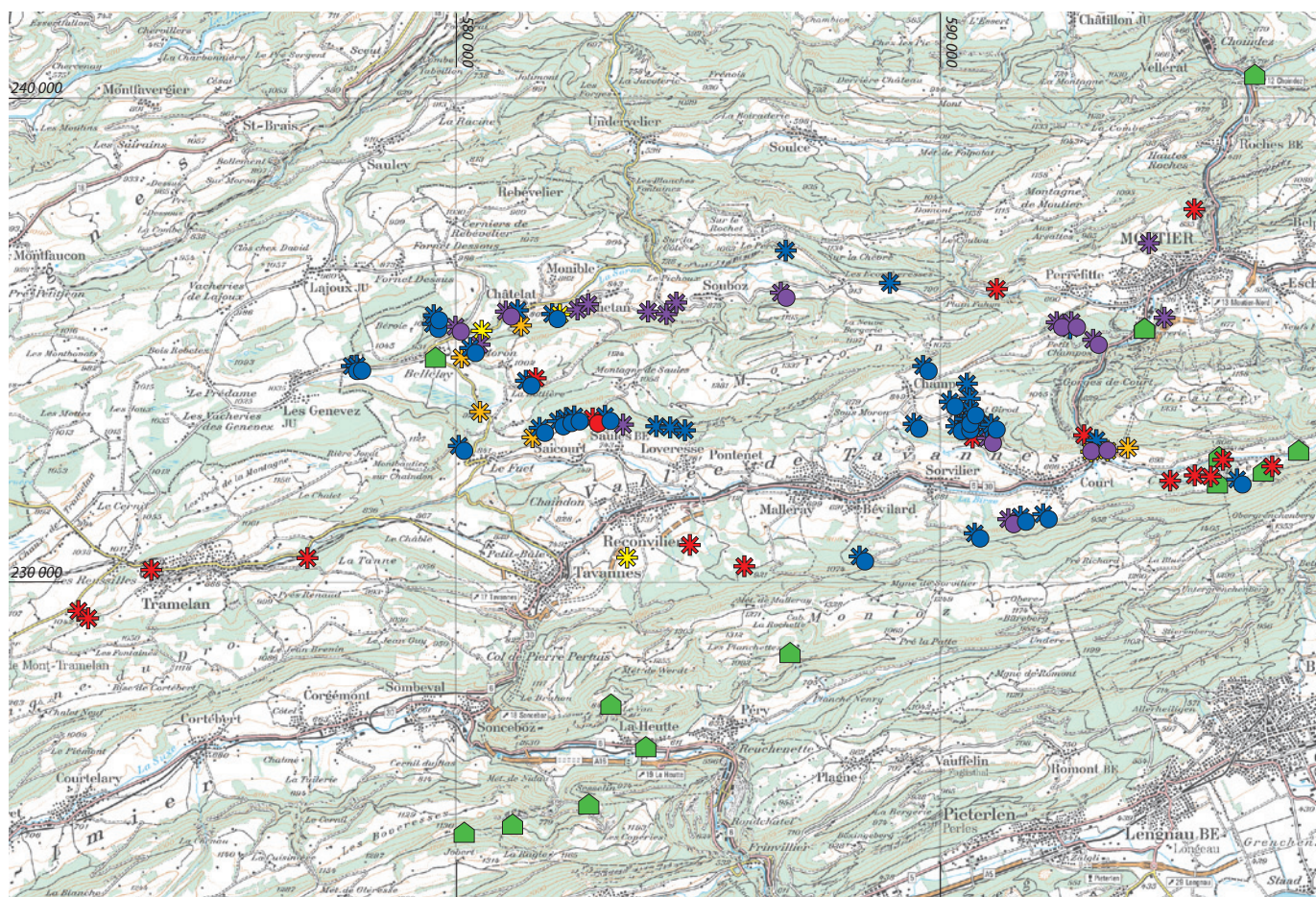
Le Sidérolithique est caractérisé, selon les régions, par des séquences argileuses et argilo-sableuses, plus ou moins riches en fer, appelées *bolus*<sup>22</sup>. Les argiles à pisolithes ferrugineux ont été exploitées par les sidérurgistes dès le Haut Moyen Âge, tandis que les argiles sableuses réfractaires ont été utilisées dans la réalisation des fours et fourneaux, puis plus tard dans la confection de briques. Ces argiles réfractaires nous intéressent aussi, car leurs gisements coïncident souvent avec ceux des sables siliceux. En effet, on retrouve régulièrement à la base de ces derniers des accumulations d'argiles entraînées dans une migration verticale par les eaux d'infiltrations. Ces gisements offrent ainsi des matériaux tant argileux que sableux. Mais il existe aussi des dépôts strictement argileux stratifiés en bancs d'épaisseur variable.

20 Gerber 2010, 24-29. Cette observation vaut naturellement pour d'autres régions ou pays.

21 Lynggaard 1975, 60-73.

22 Fleury 1909, 126-144 en particulier.





- Exploitation sable
- Exploitation sable et bolus
- Exploitation bolus
- ★ Affleurement sable
- ★ Affleurement sable et bolus
- ★ Affleurement bolus
- ★ Affleurement bolus et bohnertz
- ★ Affleurement sable, bolus et bohnertz
- Verreries attestées (15–19<sup>e</sup> s.)

Les affleurements de sable siliceux sidérolithique, dont la pureté remarquable a suscité l'intérêt des verriers, se concentrent surtout dans le Jura méridional, en particulier dans la vallée de Tavannes, le Petit-Val et autour de Bellelay<sup>23</sup>. Dans la région de Court, on les trouve sous la forme de poches plus ou moins étendues qui combrent des failles et dépressions du Karst jurassien. On en connaît de part et d'autre de la montagne de Moron : à Champoz, Saules, Saicourt, Le Fuet, Bellelay, Châtelat, Sornetan, Souboz, mais aussi à Moutier ou autour de Court, en particulier sur le Pâturage de Mont-Girod (fig. 2). S'il est difficile, faute d'indications détaillées, de localiser avec précision les gisements qui ont alimenté les verreries de Court, certains documents d'archive autorisent toutefois d'appréhender la région d'extraction.

### 2.1.1.2 Sources d'approvisionnement

Les archives épiscopales bâloises à Porrentruy conservent des livres de comptes qui fournissent des détails quant à l'exploitation de carrières de la région et indiquent même les volumes de matériaux vendus aux verreries. Malheureusement, leur nature exacte n'est pas toujours spécifiée. Sans autre précision, il pourrait théoriquement s'agir aussi bien de sable que de terre réfractaire. Il est évident qu'à l'occasion d'une nouvelle installation, les besoins en terre réfractaire sont plus importants la première année, puisqu'il faut ériger les fours. Les réparations ponctuelles se font sans doute à partir de matériau entreposé sur place. Quant à l'approvisionnement en sable, il est plus ou moins régulier d'année en année, et permet de garantir un certain stock.

Fig. 2 : Carte de répartition des gisements de sable vitrifiable et de bolus exploités ou non dans la Vallée de Tavannes, le Petit-Val et la région de Moutier. Établie d'après les sources géologiques et historiques imprimées disponibles. Ech. 1:150 000.

23 Pfluter 1997, 22-23 et 49 ; Fleury 1909, 67-71 ; Monbaron/Gobat/Le Tensorer 1998, 18-19.

Pour la période 1701/1702, les verriers du Pâturage de l'Envers font voiturier « 14 Fässer hoc Erden zu Saal [Saules]... » et 45 tonneaux « von gelben Erden » de Sornetan (Sornetan)<sup>24</sup>, qu'ils paient 1 sou 6 deniers la pièce, pour un montant de respectivement 1 livre 1 sou et 3 livres 7 sous 6 deniers. Les quantités de sable transportées varient d'une année à l'autre, mais se situent entre 10 tonneaux en 1712/13 et 45 tonneaux en 1708/09 (fig. 3). En 1711/12 et 1713/14, aucune livraison de sable

années	Saules (sable) quantité tonneau	prix £sd*	Sornetan (terre) quantité tonneau	prix £sd*
1700/01	25	1£ 17s 6d	0	–
1701/02	14	1£ 1s	45,0	3£ 7s 6d
1702/03	18	1£ 7s	10,0	15s
1703/04	15	1£ 2s 6d	8,33	12s 6d
1704/05	17	1£ 5s 6d	10,0	15s
1705/06	12	18s	0	–
1706/07	16	1£ 4s	0	–
1707/08	30	2£ 5s	0	–
1708/09	45	3£ 7s 6d	0	–
1709/10	30	2£ 5s	0	–
1710/11	44	3£ 6s	0	–
1711/12	0	–	0	–
1712/13	10	15s	0	–
1713/14	0	–	0	–
1714/15	10	15s	0	–
total	286	23£ 5s	73,33	5£ 10s

Fig. 3: Court, Pâturage de l'Envers. Livraisons de sable et de terre réfractaire attestées entre 1700 et 1715 d'après les Comptes de la recette de Moutier-Grandval 1700-1715. \* £sd = livre, sou, denier. 1 £ = 20s = 240d.

n'a lieu, contrairement à la période qui suit. En avril 1714, le bois venant à manquer, une partie des verriers adressent une requête au Prince afin d'obtenir la permission d'exploiter les forêts contigües aux terres de Soleure, soit l'extrémité orientale du Chaluët. L'autorisation est délivrée et permission leur est accordée d'y établir leurs bâtiments moyennant un cens réduit à 140 livres<sup>25</sup>. En tout, d'après les documents dont nous disposons, les verriers du Pâturage de l'Envers se seraient fait livrer 286 tonneaux de sable et 73 de terre réfractaire, entre 1700/01 et 1714/15. La période de 1699/1700 n'a pas été retenue, car elle doit encore se rapporter à la verrerie précédente de Sous les Roches. Nous n'avons trouvé ni trace ni mention d'autres sources d'approvisionnement.

La grande difficulté réside dans l'estimation de la quantité de sable effectivement transportée sur le site, car le tonneau ou la bosse, autre terme fréquemment utilisé, n'est pas une unité de mesure officielle dans l'évêché de Bâle. D'après certaines sources, la bosse de vin équivalait en Prévôté de Moutier-Grandval à 500 pots, soit quelque 1003 litres, alors qu'en terre de Neuchâtel, elle mesurait 950 litres<sup>26</sup>. Encore faut-il se rendre à l'évidence qu'un tel foudre rempli de sable pesait allègrement plus d'une tonne et demie, donc devenait peu aisé à manœuvrer ! Dans l'exploitation du minerai de fer, Quiquerez fait référence à une unité de mesure différente : le cuveau. Il n'en donne malheureusement pas la contenance, mais le poids : 270 livres, soit quelque 135 kg, ce qui représentait d'après nos calculs environ 75 litres<sup>27</sup>. Dans les Comptes de la Seigneurie de Delémont<sup>28</sup>, on trouve encore l'usage d'une benne de chaux contenant 30 penaux, soit un peu plus de 0,5 m<sup>3</sup>. En 1709, du sable de la sablonnière du Praypiat à Bellelay<sup>29</sup>, est évacué dans des chariots de respectivement 24 et 48 penaux (504 et 1004 l), le penal de la Prévôté étant de 21 l.

D'après les documents d'archives consultés, la taxe d'extraction versée au prince-évêque est identique pour un tonneau de sable ou un cuveau de minerai ; elle s'élève à 1 sou et 6 deniers<sup>30</sup>. Quoiqu'il en soit, sur la base des données dont nous disposons, il n'apparaît pas raisonnable de retenir le grand fût de vin comme unité, car la quantité de matériau transportée à la verrerie en deviendrait démesurée, avec

24 Ces deux villages sont proches de Bellelay. Il est ici question de terre de Saules (sable) et de terre jaune (argile) de Sornetan. AAEB, Comptes de la recette de Moutier-Grandval 1701/02. Une année comptable débute à la Saint-Jean-Baptiste pour s'achever le même jour, l'année suivante (paiement du cens). On y parle de Fässer (tonneau en allem.) : terme générique sans contenance définie, équivalant au français bosse que l'on rencontre aussi fréquemment.

25 Le contrat de 1714 stipule que le paiement du nouveau cens, réduit de 150 à 140 livres, se fera à la Sainte-Vérène et débutera dès la fin de l'exploitation des bois de Sairoche. Les Comptes de la recette de Moutier-Grandval révèlent qu'il fut payé pour la première fois en 1716, ce qui signifie que l'exploitation démarra entre septembre 1715 et 1716. AAEB Comptes de la recette de Moutier-Grandval 1715/16.

26 Dubler 1975, 40-46 ; Frêne 1993/1994, 49.

27 Estimation du poids spécifique du minerai à 1,8 alors que celui du sable local atteint 1,35 selon Gerber/Stern, chap. 4.3.3. Ce poids coïncide avec un sable sec.

28 AAEB Comptes de la Seigneurie de Delémont, 1763, pièces n° 34 et 35. Merci à Jean-Paul Prongué, à qui nous devons cette information. Le penal ou boisseau est compté à 18 litres d'après Dubler 1975, 37.

29 AAEB Bellelay, quoad temporalia, B 133, liasse 65, p. 84 (12 mai 1709). Le Pré Pia(t) se situe aujourd'hui au nord de Bellelay et à l'est de la Forêt de Béroie, aux coordonnées nationales 580 230/235 680.

30 Quiquerez 1855, 36 (note) et table 2. Dans son rapport de 1942, Schwab estime la contenance d'un tonneau à 10-15 Zentner de 50 kg, soit 500-750 kg ; Schwab 1942, 18. Il s'inspire peut-être de la source citée par Alois Dettling qui relate le transport de sable bernois sur l'Aar au moyen de tonneaux contenant « 10 Zentner », soit 528 kg ; Dettling 1922, 6.



plus de 286 m<sup>3</sup> de sable correspondant à une consommation annuelle de près de 19 m<sup>3</sup>/an. Quant à l'usage d'une unité équivalente à celle pratiquée pour le minerai de fer (contenance de 75 litres), elle semble au contraire presque ridicule et n'offrirait que 21 m<sup>3</sup> de sable, bien trop peu pour quinze ans de production. La réalité doit donc, à notre avis, se situer entre ces deux extrêmes et s'approcher plutôt des chiffres indiqués par Dettling (voir note 30), soit autour de 6 m<sup>3</sup> par an, soit une dizaine de tonnes. Ce sont ces derniers chiffres qui seront retenus plus loin dans les calculs de production.

A noter que l'exploitation des sables de Saicourt est attestée dès 1679, alors qu'à Saules et dans les environs de Bellelay, celle-ci démarre vraisemblablement quelques années plus tard, vers 1687<sup>31</sup>. Le sablon de la région de Bellelay<sup>32</sup> était connu loin à la ronde pour sa qualité : au 18<sup>e</sup> siècle, il était d'ailleurs même exporté au-delà des frontières épiscopales vers les verreries franc-comtoises du Doubs : Blancheroche, Bief d'Etoz, La Caborde. La verrerie alsacienne de Wildenstein, près de Saint-Amarin, se fait livrer « le sable blanc [...] de Belleleu, dans le pays de Porrentrui ». Son exportation est profitable au prince-évêque de Bâle qui en tire 4 livres de droits par voiture de 36 quintaux<sup>33</sup>. Par ailleurs, Horat indique que pour la production de verre blanc (verre parfaitement incolore), la verrerie de Kragen, dans le baillage lucernois de l'Entlebuch, s'approvisionnait en sable du Jura<sup>34</sup>.

Quant aux sites de Court, leur période d'exploitation reste mal documentée. Néanmoins, on apprend grâce à Vincenz Tschärner l'exploitation, au 18<sup>e</sup> siècle, « d'une [mine de sable] qui se trouve dans la partie méridionale du Montgirod [sic] proche de Court »<sup>35</sup>. Il signale en outre que « le sable [y est] blanc & très fin. On en faisoit autrefois un très grand usage dans une verrerie établie à l'extrémité occidentale de la vallée de Tavannes ». Malheureusement, nous ne savons pas à quel établissement Tschärner fait référence. Il ne s'agit probablement pas de la verrerie du Pâturage de l'Envers, pour laquelle les Comptes de la recette de Moutier-Grandval mentionnent des livraisons régulières de sable en provenance de Saules (voir ci-dessus), mais plutôt de celle de la Vieille Couperie qui lui succéda un peu

plus à l'est dans le Chaluet. Quoique lesdits comptes ne mentionnent aucune fourniture de sable aux verriers courtisans entre 1714/15 et 1725/26, la manufacture fonctionne et subit un incendie en 1719 avant d'être reconstruite. Dès 1726/27, les comptes témoignent d'une reprise des exportations de sable, mais sans en préciser la destination : le Chaluet ou le Doubs ? La logique voudrait que les mêmes gisements aient été exploités tant que la qualité du matériau était suffisante. D'ailleurs, ces livraisons se poursuivent ensuite bien au-delà de l'existence de la quatrième verrerie de Court<sup>36</sup>.

En tout état de cause, les gisements du Mont-Girod furent encore exploités jusqu'au milieu du 20<sup>e</sup> siècle, et alimentèrent notamment la verrerie de Moutier, alors que les argiles sableuses étaient livrées à la tuilerie du même lieu<sup>37</sup>. Un autre gisement, repéré au cours de prospections sur le tracé de l'autoroute A16, au sud-ouest du lieu-dit Petit Pré, a révélé un sable argileux blanc-beige, tendant parfois au rosé, dont les caractéristiques semblaient plus propices à la confection de céramiques que de verres. Lors des travaux autoroutiers, un glissement de terrain conséquent, immédiatement en aval de cette sablière, a nécessité d'importants travaux de terrassement. Dans le cône de déblais d'extraction de sable, les creusages ont révélé deux cheminements successifs réalisés en planches ; ceux-ci reflètent donc au moins deux phases d'exploitation successives et proches dans le temps. Malheureusement, les vestiges n'ont pu être observés qu'en coupe, dans la paroi de l'excavation. L'analyse dendrochronologique livre pour le dernier cerne mesuré une datation de 1839. Mais selon l'étude réalisée, le bois utilisé devait être postérieur à 1850<sup>38</sup>. D'ailleurs, des documents signés, notamment de la main de l'ingénieur des mines du Jura Auguste Quiquerez, retrouvés aux archives de la Bourgeoisie de Court, attestent d'opérations de prospection visant à trouver du sable vitrifiable et des argiles réfractaires sur le territoire de Court. Une concession d'exploitation fut même délivrée à la commune en 1865<sup>39</sup>. Une phase d'exploitation antérieure aux datations dendrochronologiques du gisement de Court, Petit Pré n'a pas pu être mise en évidence. Il semble dès lors que l'exploitation de ce site soit plutôt à mettre en relation avec la verrerie de Moutier, fondée en 1841.

31 AAEB Comptes de la recette de Moutier-Grandval, 1679/80 et 1687/88 ; Michel 1989, 190-191 y. c. notes. Une exploitation antérieure n'est néanmoins pas exclue.

32 Avec une préférence pour celui du Fuet, un village au sud de Bellelay : Michel 1989, 206, note 224.

33 Dietrich 1789, 115 ; 36 quintaux à 48,95 kg/q correspondent à 1762 kg, ce qui représente un bon mètre cube de sable.

34 Horat 1986, 58. Malheureusement, il ne cite pas ses sources.

35 Tschärner 1762, 167-168. A notre connaissance, il s'agit de la plus ancienne mention d'exploitation de sables au Mont-Girod.

36 AAEB Comptes de la recette de Moutier-Grandval après 1737/38.

37 Steulet 1999, 53-56.

38 Court-Petit Pré, Dendrochronologische Analyse dreier Bretter. Boll, Dendrolabor Heinz und Kristina Egger, 8. Juli 2011. Rapport déposé dans les archives du SAB à Berne.

39 Archives bourgeoises de Court, différents courriers de 1864 à 1866.

## 2.1.2 Fondants

Le verre n'est autre que le produit de la fonte de la silice, dont le point de fusion se situe au-delà de 1700° C, température qu'aucun four chauffé au bois ou plus tard au charbon de terre n'est capable d'atteindre. Pour détourner cette difficulté, les verriers ajoutent au sable une substance capable d'abaisser le point de fusion : le fondant.

Il semble que jusqu'au 10<sup>e</sup> siècle environ, l'essentiel du verre européen était importé du Moyen-Orient sous forme de lingots bruts ou de groisil, et travaillé dans des ateliers secondaires<sup>40</sup>. L'existence d'ateliers primaires en Europe au Haut Moyen Age, si elle n'est pas encore formellement démontrée, n'est a priori pas exclue. Par contre, une rupture s'observe aux alentours du 10<sup>e</sup> siècle avec l'apparition et la diffusion toujours plus large de verres dits potassiques, mises en évidence au sein de différents corpus d'analyses chimiques<sup>41</sup>. Toutefois, la fabrication de verre sodique se poursuit en parallèle, tant que l'accès aux ressources minérales nécessaires (natron ou salin du Levant) est garanti. A la même époque, une mutation s'opère également en Orient, où la cendre de plantes halophiles remplace progressivement la source naturelle de sodium sous sa forme minérale (natron)<sup>42</sup>.

Le changement observé en Europe avec l'introduction du fondant potassique constitue une transformation technologique importante; elle ne concerne pas uniquement la composition, mais touche l'ensemble de la filière de production, de la fabrication de la cendre jusqu'à l'adaptation, voire la conception de nouveaux fours<sup>43</sup> à même d'atteindre les températures plus élevées nécessaires à la fusion des compositions potassiques. On peut parler à notre avis de mutation technologique, quoiqu'aucun four de cette époque de transition n'ait encore été mis au jour. La production de verres potassiques perdurera jusqu'aux 17<sup>e</sup>-18<sup>e</sup> siècles, alors même que les verres sodiques refont progressivement leur apparition. Toutefois, dans les régions maritimes, les verres sodiques ne disparaissent pas totalement, en raison de l'utilisation de cendres issues de végétaux halophiles<sup>44</sup> (salicorne, soude brûlée, roquette...) riches en carbonate de sodium.

### 2.1.2.1 Modes de production de la cendre

La cendre végétale est un résidu poudreux gris qui résulte de la combustion complète d'une matière végétale, en général le bois. Durant sa période de croissance, la végétation fixe les nutriments (sels minéraux) qu'elle absorbe au sein de sa structure moléculaire. Après combustion, ceux-ci se retrouvent en bonne partie dans la cendre, sous forme de sels, dont la teneur varie en fonction des essences brûlées. Ainsi, comme l'a démontré Hansjosef Maus<sup>45</sup>, le milieu naturel influe de manière notoire sur les éléments chimiques contenus dans la cendre végétale, laquelle influence directement la composition du verre. Au demeurant, il est intéressant de constater que les différentes parties d'un même arbre livrent une cendre de qualité différente; les variations sont souvent nettes et peuvent donc, elles aussi, avoir leur incidence sur la composition finale<sup>46</sup>. Par contre, il n'est pas démontré que les différentes essences arboricoles croissant sur un même substrat, absorbent de manière identique les minéraux du sous-sol. Les chercheurs<sup>47</sup> admettent ou défendent volontiers l'idée d'une utilisation exclusive des cendres de hêtre, considérées comme la source principale, voire unique, de fondant potassique. En cela, ils prennent très à la lettre le texte fondateur médiéval du moine Théophile<sup>48</sup> qui conseille de réduire en cendres des rondins de hêtre bien sec. Peter Kurzmann n'a d'ailleurs pas hésité à qualifier cette opinion, largement admise, de très idéaliste et probablement assez éloignée d'une réalité plus objective qui accepte l'idée d'une cendre mêlée issue de végétaux différents<sup>49</sup>.

L'usage d'autres essences sylvestres n'est malheureusement que trop rarement discuté, même s'il ne pose a priori aucun problème particulier. Il nous paraît difficile d'imaginer les verriers engager une exploitation sélective des forêts, alors que les espaces forestiers qui leurs étaient concédés, se trouvaient souvent à l'écart, dans des endroits peu accessibles ! Qu'ils aient évité certaines essences, dont ils jugeaient – empiriquement – la cendre moins bonne ou moins adaptée à la production de verre<sup>50</sup>, reste envisageable. Mais l'argument d'une exploitation ciblée de certaines essences, tel le hêtre, nous paraît exagéré. Le savant al-

40 Les ateliers primaires produisent du verre à partir des matières premières brutes (sable, cendres ou natron); les seconds refondent du verre brut ou du groisil. Voir à ce sujet Nenna/Picon/Vichy 2000 et Wedepohl 2003.

41 Consulter la synthèse de Wedepohl reprenant ces corpus d'analyses : Wedepohl 2003, 95-102 et 109-110.

42 Freestone/Gorin-Rosen 1999, 105-116; Foy 2000, 153-155.

43 Foy/Nenna 2001, 25-26; Wedepohl 2003, 142.

44 Végétaux appréciant les milieux salés.

45 Maus/Jenisch 1998, 363-369. Il a comparé la teneur de différents sels, notamment l'oxyde de calcium (CaO), contenue dans de la cendre de hêtres issus de milieux granitique, loessique et calcaire. La comparaison des taux révèle qu'un arbre croissant sur sol calcaire absorbe et rend plus du double de CaO qu'un arbre ayant grandi sur sol granitique !

46 Voir à ce sujet Maus/Jenisch 1998, 363-368; Kurzmann 2004, 36-41 qui reprend les travaux de Bezborodov et de Wedepohl.

47 Maus/Jenisch 1998, 363-370 et 434-435. Wedepohl 2003, 133-134.

48 Theophilus c.1125/1999, vol. 1, 146; Théophile c.1125/1843, 79.

49 Kurzmann 2004, 36-38.

50 Loibl 1996a, 27 citant le *Grosses vollständiges Universal-Lexicon* de Johann Heinrich Zedler, vol. 1, 1732.

chimiste allemand Johann Kunckel, fils de maître-verrier, ne mentionne-t-il pas, certes quelques siècles après Théophile, dans son *Ars vitraria experimentalis*, que tous les végétaux sont aptes à donner une cendre utilisable en verrerie<sup>51</sup> ? Nous pensons que les verriers devaient porter une attention toute particulière à la sélection des bois de feu, certains étant néfastes à leur art, puisqu'ils dégagent beaucoup de fumée ou de gaz et modifient l'atmosphère du four.

Werner Loibl, un des rares chercheurs à s'être intéressés de près à la production de cendres, en particulier dans les verreries franconiennes (centre-sud de l'Allemagne), signale deux méthodes principales : la combustion en fosse et la combustion en tas<sup>52</sup>. Pour la première, le bois est entassé dans une grande fosse de manière à ce que la combustion soit la plus parfaite. Cette méthode est aussi connue ailleurs, notamment en France<sup>53</sup> et perdure jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle. La combustion en tas ne requiert aucun aménagement particulier et constitue la manière la plus simple de produire de la cendre à partir de végétaux. Les deux méthodes sont tributaires de conditions météorologiques sans vent ni pluie, qui occasionneraient un lessivage et une dispersion des cendres produites.

Comme la cendre était une matière recherchée par d'autres corps de métiers, les savonniers par exemple, il arrivait selon les régions que la demande soit très forte, et que la production des « faiseurs de cendres » (Aschenbrenner en allemand) opérant en forêt soit insuffisante. Aussi, certaines verreries ont-elles recherché d'autres sources d'approvisionnement et fait appel à des « collecteurs » de cendre ménagère dans les villes<sup>54</sup>.

### 2.1.2.2 Cendres potassiques

Au nord des Alpes, le fondant utilisé est la cendre tirée de la combustion d'arbres, d'arbustes, parfois de fougères. Cette pratique est attestée par des sources écrites, en particulier des traités techniques, dès le Moyen Âge (Théophile, Héraclius). La cendre végétale apporte évidemment d'autres éléments que le carbonate de potassium, par exemple du carbonate de calcium ou de magnésium et des sels métalliques. Nous parlons ici de carbonates,

bien qu'immédiatement après la réduction en cendres, ces différents minéraux existent sous la forme d'oxydes, le gaz carbonique qu'ils comportaient s'étant échappé. Mais exposés à l'air, ils réabsorbent naturellement, et dans un temps relativement court de quelques heures à quelques jours, le gaz carbonique contenu dans l'atmosphère, pour reformer des carbonates. Lors du frittage ou de la fusion dans la masse vitreuse, ces derniers perdront à nouveau leur gaz carbonique et retourneront à l'état d'oxyde, forme sous laquelle ils apparaissent dans les analyses chimiques.

Le rapport entre certains éléments chimiques composant le verre permet d'envisager le type de fondant utilisé. Cela s'avère d'autant plus vrai, si l'on connaît la source siliceuse (sable) utilisée, donc les impuretés qu'elle est censée contenir. Le rapport calcium-potassium ( $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ ) intéresse particulièrement le chercheur : une cendre brute contient une forte teneur en calcium (chap. 4.2.3 et 4.3.1.2). Cette proportion élevée se retrouve aussi dans le verre fini produit avec cette même cendre. Les verres révélant une teneur plus faible en calcium au profit du potassium suggèrent l'usage d'un fondant de meilleure qualité, obtenu selon une méthode de raffinage qui s'était développée, si l'on en croit Loibl, durant la seconde moitié du 17<sup>e</sup> siècle : la lixiviation.

### Cendres brutes

Par cendres brutes, nous entendons les résidus cendreux découlant de la combustion du bois. A part un tamisage qui permet d'éliminer les impuretés grossières, les imbrûlés et les résidus charbonneux qui nuiraient à la qualité du verre, elles ne subissent aucun traitement particulier. D'un point de vue chimique, les cendres végétales présentent, outre du carbonate de potassium, un taux de carbonate de calcium élevé, ce qui se traduit dans le verre par un rapport  $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$  élevé (voir chap. 4, fig. 94). Ces verres sont désignés comme calco-potassiques, en référence à leur forte teneur en ces deux éléments. La présence de chaux ( $\text{CaO}$ ) est essentielle, car elle stabilise le verre et le rend moins sensible à l'humidité.

L'analyse chimique des verres du Pâturage de l'Envers a montré que l'ensemble de la production se rattache à la catégorie des verres calco-potassiques. Quoique le rapport

51 Kunckel 1679/1975a, 347 : « alle Vegetabilia, es seyn Bäume/Stauden/Hecken/Kräuter u. nach ihrer Destruction, oder wann sie mit Feuer zu Aschen verbrannt/ einerley Sälze geben ». Voir Holbach 1752, 307-308 pour la traduction française.

52 Loibl 1996a, 33-35.

53 Loysel 1799/1800, 126.

54 Loibl 1996a, 43-46. Ces collectes sont attestées dès le 17<sup>e</sup> siècle au plus tard ; Merret et Kunckel y font déjà allusion dans leurs remarques au traité *L'arte vetraria* de Neri.



$\text{CaO/K}_2\text{O}$  puisse varier parfois fortement d'un échantillon à l'autre, certains regroupements ont été possibles. Selon sa qualité, le sable peut aussi apporter une partie du calcium contenu dans le verre.

### Cendres lessivées

Longtemps la composition verrière consistait en un mélange de sable et de cendres végétales qui était calciné ou non. La qualité du fondant fut améliorée grâce à l'élimination des impuretés par tamisage, puis lessivage. La cendre était déposée dans une cuve et mélangée avec de l'eau, avant d'être filtrée, soutirée et portée à ébullition. La masse grisâtre, tapissant le fond de la cuve après évaporation, était encore calcinée sur une sole chauffée. Le nouveau produit obtenu, fortement concentré en carbonate de potassium, était conditionné en fût et portait le nom générique de potasse (voir ci-dessous pour l'origine du mot). Ce procédé est déjà décrit dans les anciens traités de l'art du verre de Vanoccio Biringuccio, Antonio Neri et Georgius Agricola<sup>55</sup>, où il se rapporte à l'extraction des composés sodiques contenus dans les cendres de plantes maritimes. Dans les régions côtières, l'usage de cendres sodiques a perduré, puisque l'accès aux végétaux maritimes était garanti (voir chap. 2.1.2). Par contre, l'extraction du carbonate de potassium à partir de cendres « continentales », dans le but d'épurer et d'améliorer la qualité du fondant, ne paraît se développer qu'à partir du 17<sup>e</sup> siècle; dans tous les cas, elle n'est pas mentionnée ou décrite auparavant. En 1679, Kunckel indique qu'en lieu et place de la « levantinsche Pulver », la cendre tirée de la roquette à laquelle Neri fait allusion, n'importe quel autre végétal peut servir: « man nehme was vor Art Kraut man wolte [...] Kräutern oder Bäumen »<sup>56</sup>. Ses expériences ont montré que tous les végétaux contenaient des sels aptes à faciliter la fusion du verre et qu'ils gagnaient à subir un lessivage préalable<sup>57</sup>. Denis Diderot souligne que les grands producteurs de « potasse » extraite de cendres de bois sont les pays d'Europe du Nord riches en forêt: Russie, Lituanie, Suède, Pologne. Il ne mentionne pas l'Allemagne, qui pourtant devait être un producteur non négligeable. La cendre de Dantzig (PL) était, semble-t-il, particulièrement appréciée, mais aussi très onéreuse<sup>58</sup>.

Dans la littérature technique et spécialisée, une confusion s'est rapidement installée entre cendres végétales et potasse. Loibl<sup>59</sup> a démontré que jusqu'au milieu du 17<sup>e</sup> siècle, le mot allemand *Pott-Asche* (*pot-ash* en anglais, soit littéralement *cendres de pot*) désignait le contenant en bois, une sorte de barrique, dans lequel était conditionnée et transportée la cendre, plus particulièrement la cendre de guède<sup>60</sup>, destinée à la teinturerie. Comme l'a démontré Loibl, ces mêmes fûts vides étaient recherchés, car après combustion, ils fournissaient un excellent fondant pour la verrerie, le bois s'étant imprégné en carbonate de potassium par contact<sup>61</sup>. Donc le mot *Pottasche* désignait à l'origine le contenant et non le contenu. Dès le milieu du 17<sup>e</sup> siècle, la lixiviation de la cendre se généralisait. Le produit obtenu n'était alors, nous l'avons vu, plus une cendre, mais une substance raffinée, concentrée en carbonate de potassium. Durant cette opération, le lixiviat était porté à ébullition dans des sortes de bacs ou chaudrons métalliques appelés *Pöten*<sup>62</sup>, en allemand. Mais paradoxalement, les verriers ne connaissaient pas encore la composition chimique du sel qu'ils utilisaient; l'identification formelle du carbonate de potassium n'intervint qu'en 1742, grâce à Antonio Campanella<sup>63</sup>. L'*Encyclopédie* fait systématiquement référence à la purification et au lessivage de la cendre; le produit obtenu porte le nom de potasse et la cendre brute n'est plus mentionnée comme fondant. « Chaque pays suit une méthode particulière pour obtenir de la *potasse*; on n'emploie à cet usage que de vieux arbres qui se pourrissent; ceux qui y sont le plus propres sont le chêne, le hêtre, le peuplier, le frêne, l'orme, le houx, le bouleau, le noisetier, & tout le bois blanc. Les pins, les sapins, & tous les bois résineux ne sont point bons pour cela en Suède »<sup>64</sup>. Le terme français *potasse* désigne aujourd'hui un minerai composé de carbonate et de chlorure de potassium, qui ajoute encore à la confusion.

Par rapport aux verres à fondant sodique, les verres potassiques offrent l'avantage de pouvoir être façonnés plus longtemps sans avoir à les réchauffer trop souvent<sup>65</sup>. Dans certaines régions, germaniques en particulier, il existait de petits métiers spécialisés, à l'image de l'*Aschenbrenner*, littéralement le « faiseur de cendres » et du *Salzsieder*, le fabricant de sa-

55 Biringuccio 1540/1977, 42; Neri 1612/1980, 2-3; Agricola 1556/1992, livre XII. Toutefois Agricola n'y fait pas référence dans son chapitre consacré au verre!

56 Kunckel 1679/1975a, 50 et 52.

57 Kunckel 1679/1975a, 52-53 et 327-328: remarque similaire de Merret traduite par Kunckel.

58 Diderot/D'Alembert 1765b, 179; Krünitz 1810, 458.

59 Loibl 1996b, 80-82; voir aussi Maus/Jenisch 1998, 369-370.

60 Ou pastel des teinturiers, *Isatis tinctoria*.

61 Voir aussi Krünitz 1810, 458 pour la question de l'origine de la cendre de guède (vedasse ou Waidasche allemande).

62 Singulier Pot ou Pott; voir en particulier Loibl 1996b, 80 et 142, notes 4 et 5.

63 Martin 2010.

64 Diderot/D'Alembert 1765b, 179. Bosc d'Antic 1780, tome 1, 102-104 parle de potasse rouge pour la cendre tirée de végétaux.

65 Lynggaard 1975, 67.

lin. Ces métiers semblent moins fréquents en terre francophone, du moins n'en trouvons-nous que rarement mention.

### 2.1.2.3 Quantification

La combustion de végétaux fournit des volumes de cendres qui varient selon les espèces, mais aussi en fonction des parties utilisées. De manière générale, les plantes herbacées et les branches donnent plus de cendres que les grandes pièces ligneuses, tels les troncs. Cette question a largement occupé les encyclopédistes dans l'espoir de découvrir les végétaux les plus aptes à fournir le salin ou fondant nécessaire à la fabrication du verre. La composition même de la cendre varie, nous l'avons vu ci-dessus, en fonction de la nature du sous-sol. De récents travaux ont comparé différents états de siccité de trois végétaux, dont les cendres sont appréciées des verriers : le hêtre, le chêne et la fougère. Après combustion totale, le rapport entre le poids de la cendre obtenue et le poids initial du végétal séché à l'air avant combustion représente un peu plus d'un pour-cent<sup>66</sup>. On peut donc admettre que 100 kg de bois sec produisent environ 1 kg de cendres, soit 1 % du poids net initial. Ce rapport diminue environ de moitié, à 0,5 %, en cas d'utilisation de bois frais riche en eau. Après lixiviation, le résidu fortement enrichi en carbonate de potassium ne pèse plus que 100 g environ<sup>67</sup>, soit 1 ‰ du poids initial du bois. En résumé, une tonne de bois sec fournit un kilogramme de cendres lessivées !

### 2.1.2.4 Origine de la cendre utilisée au Pâturage de l'Envers

Les verriers installés au Pâturage de l'Envers avaient obtenu du prince-évêque une concession qui définissait avec une certaine précision le périmètre forestier dont ils pouvaient bénéficier<sup>68</sup>. Ils y ont implanté leurs installations dans un des rares espaces à peu près plats, au pied du versant nord du Montoz, à 820 m d'altitude. Les bois à exploiter se trouvaient en majeure partie sur les pentes de l'envers de la vallée. A leur arrivée, dans la seconde moitié du 17<sup>e</sup> siècle, les forêts, encore exploitées de manière traditionnelle et peu intensive, à tout le moins dans cette partie reculée de la val-

lée, conservaient certainement un état proche de l'état naturel, donc un peuplement assez âgé, assurément non jardiné. Aussi, ne fait-il guère de doute que, pour leur cendre, les verriers aient fait brûler du hêtre, mais probablement aussi d'autres feuillus, tels que l'érable, le frêne et l'orme. L'utilisation de résineux (sapin blanc et épicéa), bien présents dans les forêts jurassiennes, doit aussi être envisagée car ils conviennent également, même si certains les jugèrent mal adaptés en raison notamment de leur moins bon rendement et de leur action teintante<sup>69</sup>. Les bûcherons réduisaient peut-être eux-mêmes les bois en cendre : le houp-pier – ensemble des branches – l'était en priorité, ainsi qu'une partie du tronc<sup>70</sup>. Le reste servait de combustible pour les fours ainsi que les foyers domestiques. L'activité devait se dérouler à l'emplacement même de l'abattage, ce qui permettait de nettoyer la place et de limiter les masses à transporter. L'impression de gigantesque gaspillage que donnait cette activité transparaît çà et là dans les documents d'archives : la verrerie dévorait la forêt tel un ogre.

### 2.1.2.5 Volume théorique de cendre

Les questions de quantification des volumes de cendre utilisés par les verriers ont préoccupé les chercheurs de manière récurrente. Nombre d'auteurs se sont penchés sur la question et ont produit des résultats très différenciés. Traditionnellement, depuis le moine Théophile, les recettes verrières indiquent une composition de rapport 1:2, soit 1 partie de sable pour 2 parties de cendres<sup>71</sup>, sans que l'on sache s'il s'agit d'une part de même volume ou de même poids. Gerber/Stern partent du principe qu'il s'agit d'un rapport pondéral et tentent de le démontrer au travers de travaux expérimentaux personnels obtenus récemment (voir leur développement chap. 4.3.2 et 4.3.3). L'échantillonnage mériterait d'être étendu et répété afin d'être plus représentatif de la variabilité des résultats, les caractéristiques de la cendre dépendant de différents facteurs, dont la station et le type végétal ne sont pas des moindres. Le litre de cendre stockée obtenue par Stern pèse 350 g, dont il ne reste après calcination plus que 157 g (perte de 66 % de poids). Le mélange à parts égales (de poids) de cendre et de sable siliceux livre une composition chimique

66 Jackson/Smedley 2004, 39. Valeurs obtenues en laboratoire : 1,16 % (hêtre), 1,76 % (chêne) et 1,53 % (fougère). Par commodité, nous retiendrons la valeur de 1 %, tout en étant conscient qu'en pleine nature, une partie de la cendre était dispersée ou perdue (vent, pluie). Voir aussi Gerber/Stern, chap. 4.3.2 et 4.3.3.

67 Larousse 1874, tome 12, 1511 citant le chimiste Anselme Payen, sans donner de référence.

68 AAEB A55/24 Moutier-Grandval (Bois et forêts), 27 septembre 1699.

69 Diderot/D'Alembert 1765b, 178-180 et Bosc d'Antic 1780, tome I, 104 (note). Après Merret, Krünitz estime les résineux bien adaptés, mais leur cendre non lessivée ne peut être associée qu'à des volumes de sable plus faibles : Kunckel 1679/1975a, 327 (note) et Krünitz 1779, 588.

70 Le volume du houp-pier varie d'une espèce à l'autre. Un arbre moyennement branchu produit environ 1,5 st de houp-pier (rondins et charbonnettes) par m<sup>3</sup> de fût. En raison des faibles sections retenues, le poids du stère de houp-pier atteint environ 400 kg. Sources : <http://passion.bois.free.fr/le%20matériau%20bois/l'abattage/abattage.htm#B> - Cubage des bois sur pied et <http://foret-ardennes.fr/?page=dossiers&lang=fra> (Document PDF Le Cubage de bois sur pied). Pages consultées le 06.07.2012.

71 Theophilus c.1125/1999, vol. I, chap. IV. Voir à ce sujet Turner 1956a, 39-44.

qui coïncide avec celle de notre site. Le mélange est susceptible de passer à 2:1, lorsque le verrier utilise de la cendre stockée, car elle se réhydrate et se recarbonate (absorption d' $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CO}_2$ ), ainsi que le signale Stern, ce qui engendre un doublement du poids. Mais, tant l'eau que le gaz carbonique se volatilisent au cours de la calcination.

En partant des données de laboratoire obtenues par Jackson/Smedley pour le hêtre, il est envisageable d'estimer approximativement les besoins minimums en matières premières de la verrerie du Pâturage de l'Envers. En admettant que les 286 tonneaux de sable transportés sur place (voir chap. 2.1.1.2) représentent le poids estimé de 151 t, cela représenterait une consommation annuelle de sable de 10 t environ. La transformation de 10 t de sable en verre nécessite un poids équivalent de cendres fraîches ou le double (20 t) de cendres stockées. La production de 10 t de cendres fraîches requiert quelque 2000 t de bois frais<sup>72</sup>.

Sachant que la contenance moyenne de la forêt jurassienne atteint 350 m<sup>3</sup> à l'hectare, le produit peut être estimé à quelque 350 t de bois frais qui, débitées, livrent 465 st environ<sup>73</sup>. En tenant compte du houpier que les verriers ont sans doute aussi réduit en cendre, le rendement à l'hectare passe à près de 560 t<sup>74</sup>. Dès lors, nous sommes en droit d'estimer à 3,5 ha la surface défrichée chaque année par les verriers pour assouvir leur seul besoin de fondant potassique (2000 t : 560 t/ha = 3,5 ha). Au cours des quinze années d'exploitation, la verrerie du Pâturage de l'Envers aurait ainsi englouti quelque 53 ha. Cette surface estimée représenterait un disque de quelque 410 m de diamètre. Cette estimation ne tient pas compte des besoins en combustible des fours et des ménages verriers (voir chap. 2.1.6).

Dans les contrats d'achat de bois, il est tantôt fait référence à des surfaces forestières, tantôt à des volumes sur pied, ce qui complique les comparaisons et les calculs. La distinction entre la part destinée à être transformée en cendre et celle servant de combustible n'apparaît jamais ; aussi doit-on envisager la consommation de bois de manière globale. Cet aspect de la question est repris et développé au chapitre 2.1.6. Dans son estimation, Stern impute le bois de section inférieure à 7 cm au chauffage des fours (voir chap. 4.3.2).

### 2.1.3 Chaux

Dans la composition vitreuse, la chaux joue un rôle de stabilisant et rend, en outre, le verre plus dur, tout en lui conférant une certaine brillance. Comme elle n'est pas mentionnée dans les traités médiévaux, nous devons estimer qu'elle ne fait pas partie des ingrédients incorporés consciemment dans la composition vitrifiable. Toutefois, il convient ici de rappeler que Pliny l'Ancien<sup>75</sup> mentionnait l'ajout ponctuel de coquilles marines dans la composition. Ceci sous-entend une grande latitude dans les recettes dès l'Antiquité. Toutefois, nous avons vu plus haut que le sable et les fondants obtenus à partir de cendres végétales comportent, pour autant qu'ils ne soient pas complètement épurés, une certaine proportion de carbonate de calcium, qui pouvait suffire à stabiliser le verre. Sous l'effet de la cuisson, ce dernier se transforme en chaux ( $\text{CaO}$ ).

La chaux se retrouve tant dans les verres sodiques que potassiques ; toutefois, dans ces derniers sa proportion est nettement plus élevée et peut atteindre 12 à 20 %<sup>76</sup>. Dans les verres du Pâturage de l'Envers, elle atteint entre 6,7 et 25,1 %, la moyenne étant autour de 19 % environ (voir annexe 2). Par ailleurs, la cendre végétale et le sable apportent aussi différentes impuretés dans la composition, comme de l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , de l'oxyde ferrique  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou de l'oxyde de magnésium  $\text{MgO}$ , qui ont tous une fonction stabilisatrice.

Ni Kunckel, ni Merrett, ni [Neri] avant eux, ne mentionnent l'adjonction de calcaire ou de chaux dans la composition, ce qui sous-entend que le mélange est toujours basé sur deux ingrédients principaux (sable et cendres), mêlés selon des proportions variables. À partir du 18<sup>e</sup> siècle, l'usage d'ingrédients toujours plus purs dans les compositions a rendu l'adjonction de chaux nécessaire<sup>77</sup>, son rôle ayant été dès lors reconnu. On assiste alors à l'élaboration de recettes ternaires.

### 2.1.4 Groisil

Le groisil, appelé aussi calcin ou casson<sup>78</sup>, désigne les débris de verre issus de la production de la verrerie. Ceux-ci sont récupérés et conditionnés par couleur dans des baquets ou des caisses. Dans la gobeletterie, l'ajout de groisil

72 Rendement moyen de 0,5 % : voir chap. 4.3.1 et chap. 2.1.2.3.

73 Voir Gerber/Portmann/Kündig 2002, 110, note 142. Ces 465 st comprennent le bois d'un diamètre supérieur à 7 cm. Le mètre cube de bois frais compté à 1 tonne, le stère frais à 750 kg et 550 kg séché à l'air. Le mètre cube équivaut à 0,75 st. Valeurs tirées de l'Agenda forestier et de l'industrie du bois 2012.

74 Le poids de 525 st de houpier/ha est estimé, selon note 70, à 210 t.

75 Pliny, *Histoires naturelles*, livre 36, § 194.

76 Wedepohl 2003, 91-110 et 212-215 (tables) ; Foy 1989, 40.

77 Loysel 1799/1800, 118 ; Bosc d'Antic 1780, tome 1, 117-118 et 215-218.

78 En principe, ces termes suggèrent une qualité de fragmentation différente : calcin et casson représentent une fraction plus grossière que le groisil.

aux compositions de verre a pour but « d'augmenter la malléabilité du verre pendant le travail et son élasticité après le recuit »<sup>79</sup>. Mais elle est intéressante à plusieurs titres, puisque les débris vitreux recyclés, entrant en fusion plus vite que le reste de la composition, accélèrent le processus de fonte de la fritte ou du sable mêlé de cendre. Par contre, d'après les artisans-verriers consultés<sup>80</sup>, la durée d'affinage, c'est-à-dire le processus d'homogénéisation de la masse vitreuse provoquant la disparition des bulles gazeuses, prend du temps et peut durer une douzaine d'heures, indépendamment de l'ajout ou non de groisl. Selon eux, la pratique voudrait qu'un maximum de 70 % de groisl de même composition chimique soit ajouté au mélange ; une charge formée de 100 % de verre recyclé est envisageable pour autant qu'elle soit de composition chimique identique. En diminuant le temps de fusion du mélange, le groisl contribue à réduire la consommation de combustible. Toutefois, certains déchets de production, comme les meules, ne sont pas systématiquement collectés, en raison des impuretés qu'ils contiennent. Les verriers évitent d'introduire ces corps étrangers dans leur mélange, car ils entraînent une coloration indésirable du verre.

Au Moyen Âge, le verre était un matériau suffisamment rare ou peu commun pour que sa collecte soit organisée par des ramasseurs, qui le triaient par type et couleur, en particulier dans les villes. L'ajout de verre « étranger » à la composition vitreuse modifie non seulement le chimisme de la charge, mais aussi le comportement physique du mélange, ce qui a une incidence sur le point de fusion, la malléabilité et la durée de travail du verre. Pour le chercheur, ces ajouts hétérogènes compliquent singulièrement l'identification des ingrédients utilisés. Dès le début des Temps modernes, l'accès facilité aux matières premières et le développement d'une production de masse, allaient permettre aux verriers d'utiliser le groisl issu de leur propre production.

Sur le site du Pâturage de l'Envers, la régularité des valeurs obtenues dans les analyses permet d'exclure l'usage de groisl extérieur au site (voir chap. 4.4 et annexe 2). Les quantités importantes de verre brisé qui jonchaient les sols du site appellent deux observations : le volume de production est important et la ré-

cupération du verre brisé ou des ratés n'est pas systématique, du moins pour le verre commun de couleur verte, nettement majoritaire. Nous imaginons assez volontiers un tri sélectif privilégiant les gros tessons et les paraisons ratées, ainsi que les pièces de qualité supérieure, tels les verres incolores ou de couleur.

### 2.1.5 Matières décolorantes, colorantes et opacifiantes

Parmi les substances colorantes et opacifiantes, nous n'aborderons que celles qui semblent avoir été effectivement utilisées sur le site, soit le manganèse, le cobalt, les opacifiants blancs et les émaux rouges.

#### 2.1.5.1 Manganèse

L'atténuation ou l'élimination de la teinte verdâtre « naturelle » du verre, qui découle de la présence dans le sable et/ou la cendre d'oxydes métalliques teintants ( $\text{FeO}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), pouvait aussi s'opérer par l'adjonction d'une roche particulière contenant du manganèse, appelée « savon des verriers »<sup>81</sup>. Ce principe connu est déjà décrit par Pline l'Ancien<sup>82</sup> au premier siècle de notre ère.

Les composés de manganèse se trouvent dans différentes roches exploitées depuis des siècles. Les gisements les plus proches se situent dans le sud de l'Allemagne et en Bohême, régions à forte tradition verrière. Kunckel signale que la région des Monts Métallifères (Erzgebirge) autour de Schneeberg et celle de la Bohême fournissaient un minerai de manganèse à prix modeste<sup>83</sup>, mais des minerais de manganèse furent aussi exploités en Forêt-Noire proche, région dont proviennent une partie des maîtres-verriers actifs à Court. D'autres gisements riches sont aussi attestés en Suisse, notamment dans l'Oberhalstein GR et à Gonzen SG<sup>84</sup> ; le Jura ne connaît pas de tels gisements. Des fragments de minerais riches en manganèse ont été retrouvés sur notre site (fig. 4). Mais comme leur identification définitive n'a pas pu être réalisée, leur provenance reste mystérieuse. Néanmoins, il apparaît que leur teneur en manganèse est très élevée avec quelque 80 %<sup>85</sup>, ce qui confirme leur application dans la fabrication de certains verres, en particulier les verres incolores.



Fig. 4 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragment de minerai de manganèse retrouvé dans le secteur A, zone 13. Cont. 81332. Ech. 1:1.

79 Larousse 1867, tome 3, 111 (article Calcin).

80 Je tiens à remercier Eva Van Eeckhout-Bartova et Alain Guillot pour leurs suggestions et remarques pertinentes.

81 En allemand : Glaserseifen ou Braunstein.

82 Pline, *Histoires naturelles*, livre 36, § 192, d'après Kurzmann 2004, 42. Le manganèse apparaît ensuite dans tous les traités verriers importants depuis le 16<sup>e</sup> siècle.

83 Kunckel 1679/1975a, 55.

84 Suana 1984, Pfeiffer/Oberhansli/Epprecht 1988 et Geiger 1948.

85 Analyse et commentaire transmis par Vincent Serneels, Département des Géosciences de l'Université de Fribourg, 14.08.2012.



Kurzmann décrit clairement les différents stades du processus de transformation, respectivement de masquage de la couleur verte indésirable. Il insiste aussi sur l'incidence de l'atmosphère du four durant la fusion et le soufflage du verre. Reprenons brièvement les fondamentaux de son propos<sup>86</sup> : FeO teinte le verre en bleu pâle, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en jaune. En atmosphère oxydante, l'apport d'air frais favorise la forme oxydée Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et donne une couleur jaune au verre, alors qu'en atmosphère réductrice, pauvre en oxygène, la couleur tendra vers le bleu. Lorsque le milieu est homogène et présente un équilibre relatif des deux formes d'oxydes de fer, les couleurs s'additionnent pour donner une teinte verte. L'ajout de manganèse, sous sa forme MgO<sub>4</sub>, provoque la formation de MgO<sub>3</sub> en présence d'une forte chaleur et libère de l'oxygène qui modifie FeO en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Nous avons vu que Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> teintait le verre en jaune. De son côté, MgO<sub>3</sub> donne une couleur rouge violet. L'addition des deux crée un verre gris transparent. Les oxydes, quoique toujours présents, ont simplement été masqués.

La présence de manganèse dans les analyses chimiques des verres ne trahit pas toujours l'ajout de substances décolorantes/masquantes, mais peut aussi provenir de la cendre végétale. L'oxyde de manganèse confère une teinte rose ou violacée au verre. L'ajout du manganèse finement broyé ne se fait pas au stade de la composition, mais en fin du processus de fusion, après le maillage de la masse vitreuse<sup>87</sup>. Les quantités de manganèse ajoutées sont faibles et se limitent en général à quelques pourcents du poids du verre.

### 2.1.5.2 Cobalt

La présence sur le site de déchets de verre bleu (meules, découpes, etc.) attestent cette production qui, au vu du nombre restreint de fragments, restait très confidentielle avec moins de 1 % des pièces (voir chap. 3.3.2). Traditionnellement, le cobalt est le minéral qui permet d'obtenir de beaux verres bleus, mais il est également possible de travailler avec des émaux qui sont ajoutés au verre en fusion. Le cobalt n'existe pas à l'état pur, mais se trouve en association avec des minerais métallifères (fer, argent ou cuivre). Quant aux émaux, ils consistent en de simples pastilles de verre de teinte

saturée qui, réduites en poudre à l'instar du minerai, étaient incorporées au verre en fusion. Nous ne connaissons ni le type ni l'origine de la substance utilisée à Court. Comme le minerai de cobalt fait défaut dans l'arc jurassien et qu'il est difficile d'accès sur le territoire suisse, il est vraisemblable que les verriers se soient approvisionnés, au même titre que pour le manganèse, dans leur pays d'origine où l'extraction de roches contenant du cobalt est attestée à cette époque<sup>88</sup>.

Les verres bleus analysés par Gerber/Stern révèlent la présence de cobalt à raison de 50 à 600 ppm (voir chap. 4.3.2), parallèlement à des valeurs élevées pour certains éléments rares comme le nickel (116 à 163 ppm) ou le plomb (627 à 631 ppm). Gerber/Stern envisagent l'usage de minerai ou d'émaux colorés par des minerais issus des Monts Métallifères, entre Saxe et Bohême, ou de Forêt-Noire.

Par contre, parmi les petits creusets retrouvés sur le site, l'un d'entre eux révélait des restes de verre d'un bleu intense qui attestent peut-être de la préparation même de cette couleur sur place. Le creuset, dont la matrice argileuse présente des traces de cuisson normales, sans vitrification interne, indique une exposition au feu plutôt brève et d'intensité moyenne (voir chap. 5.8.3 ; fig. 177-179).

### 2.1.5.3 Os calcinés

L'opacité dans les verres résulte d'une précipitation de certains composants du verre lors de la phase de refroidissement. La plupart des composants opacifiants utilisés dans la verrerie ancienne sont à base d'antimoine, d'étain ou de plomb<sup>89</sup>. La poudre d'os calcinés contribue aussi à opacifier le verre. Quoique cette technique fut connue dès le 15<sup>e</sup> siècle, d'aucun ont pensé qu'elle fut inventée par les verriers allemands. L'usage d'os calcinés, encore mentionné par Eugène Péligot dans le dernier quart du 19<sup>e</sup> siècle<sup>90</sup>, reste toujours d'actualité auprès de certains verriers d'art. Dans la poudre d'os calcinés, l'agent opacifiant est un composé phosphaté : le phosphate de calcium, qui contient selon Maus jusqu'à 40 % de phosphore<sup>91</sup>. Selon la teneur en opacifiant et l'épaisseur de la paroi, le verre devient plus ou moins translucide. Son apparence vise à imiter la faïence, mais surtout la porcelaine dès le 18<sup>e</sup> siècle.

86 Kurzmann 2004, 206-208.

87 Bontemps 1868, 93.

88 Bontemps 1868, 96-97 ; Maus/Jenisch 1998, 372-373.

89 Moretti/Hreglich (à paraître) ; article consultable en ligne sous : [http://www.verre-histoire.org/colloques/innovations/pages/p202\\_01\\_moretti.html](http://www.verre-histoire.org/colloques/innovations/pages/p202_01_moretti.html). Page consultée le 4.10.2012.

90 Péligot 1877, 423-424.

91 Voir Maus/Jenisch 1998, 426-428 qui détaille différentes techniques en usage en Forêt-Noire pour obtenir du verre blanc.

Parmi le corpus d'os d'animaux collectés à Court, Pâturage de l'Envers, les archéozoologues du Naturhistorisches Museum der Burgergemeinde Bern Marc Nussbaumer et André Rehazek<sup>92</sup> ont relevé que près de 45 % des os collectés présentaient des traces de feu. Par ailleurs, 99 % d'entre eux proviennent du secteur de production A qui englobe la halle verrière. Deux interprétations sont possibles : soit il s'agit de reliefs culinaires brûlés de manière non intentionnelle, soit ces os ont été calcinés en vue d'un usage précis. Les deux archéozoologues mettent ces traces de feu en lien avec la production de verre plutôt qu'avec les pratiques culinaires, car la viande grillée constituerait, selon eux, une habitude plutôt récente. Le souci d'éliminer les os par combustion n'a guère de sens non plus : d'une part les odeurs générées sont désagréables et d'autre part, à cette époque, les déchets alimentaires profitaient aux petits animaux d'élevage.

Si la présence de contenants finis en verre opaque blanc est attestée sur ce site, les déchets de production attendus (meules, découpes par exemple) sont très rares (fig. 5), malgré une fouille fine dans le secteur de la halle. Cette discrétion ne parle guère en faveur d'une production de verre opaque ; l'essentiel des récipients retrouvés sur place proviendraient plutôt des inventaires de ménage. Par contre, le passage en revue de l'important corpus de verre récolté par René Bassin sur le site de la verrerie de Sous les Roches, qui précéda immédiatement notre établissement<sup>93</sup>, a révélé la présence indiscutable de déchets (rognures, meules) de verre opaque blanc de qualité<sup>94</sup>. Il se pourrait dès lors que les verres opaques retrouvés au Pâturage de l'Envers aient suivi les verriers de Sous les Roches qui fondèrent le nouvel établissement verrier : soit les familles d'Elisabeth Mäguelin, veuve de Hans Schell, d'Adam Schell (frère du précédent ?) et de Johann Grässli, maire de la communauté depuis 1697.

#### 2.1.5.4 Antimoine

Enfin, parmi les substances vitreuses opaques, il convient ici de traiter brièvement de deux groupes de débris retrouvés sur le site : les baguettes ou tubes incolores remplis d'une matrice blanche et les nodules rouges marbrés de noir. Pour les premiers, il s'agit de tubes



Fig. 5 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragments de verre opaque. Ech. 1:1.

de verre incolore ou vert-clair, de 2 à 7 mm de diamètre, dont le cœur contient une substance opaque, dense, parsemée parfois de microbulles d'air. Ces éléments sont caractéristiques de la production de verre filigrané. En tout, 163 fragments d'un poids total de 155 g ont été collectés sur notre site, en plus des déchets attestant la production de verre filigrané. Les analyses chimiques de la matrice blanche (voir chap. 4.2.4.2) ont révélé la présence d'oxyde d'antimoine et d'oxyde de plomb présents respectivement à 14,3 et 5,1 %. L'antimoine est un minéral toxique. Dans la nature, il se trouve sous forme de sulfure, le plus connu étant la stibine ou antimonite. Ce minéral était grillé simultanément avec le reste de la composition avant d'être introduit dans le creuset. Wedepohl a en outre démontré que l'antimoniate de calcium (apatite) était un opacifiant utilisé de longue date par les verriers<sup>95</sup>.

#### 2.1.5.5 Verre opaque rouge

Parmi les déchets récoltés, on relève la présence de nodules et fils rouges opaques, parfois veinés de bleu-noir, qui correspondent à des déchets de production (fig. 6). Il semble qu'il s'agisse de petites quantités de verre qui, fondues, pouvaient

Fig. 6 : Court, Pâturage de l'Envers. Déchets marbrés de rouge avec fil rouge. Ech. 1:1.

92 Gerber et al. (à paraître) : « Die Tierknochen » dans Court, Pâturage de l'Envers, vol. 4.

93 Gerber 2010, 28 et 35.

94 Dépôt SAB, cont. 100620.

95 Wedepohl 2003, 27-28 et 33.

servir à décorer des objets ou récipients en verre. Parmi les treize fragments récoltés, huit proviennent du périmètre de l'habitation 2. Ces rares déchets de production rouge opaque n'ont pour l'heure fait l'objet d'aucune analyse chimique; aussi n'en connaissons-nous pas la composition. Curieusement, le site n'a livré aucun tesson portant des filets rapportés rouges. La teinte rouge peut notamment être obtenue par l'adjonction d'oxyde de cuivre, qui existe à l'état naturel et porte le nom de cuprite ( $\text{CuO}_2$ ). A cet égard, tant Neri, que Kunckel, Krünitz ou Bontemps, pour ne citer qu'eux, énumèrent des recettes qui permettent d'obtenir différentes tonalités de rouge.

## 2.1.6 Bois

Le bois joue un rôle capital dans l'économie du Moyen Âge et des Temps modernes: tout d'abord comme matière première destinée à la construction, mais aussi comme source d'énergie liée aux tâches quotidiennes et encore plus à l'artisanat, en particulier pour les métiers associés au feu. La verrerie compte parmi les activités artisanales gourmandes en bois et ce à double titre. Si le bois sert de combustible dans les différents fours, il entre surtout, sous la forme de cendre, dans la composition du verre, où il fait office de fondant accélérant la fusion du sable siliceux. Ces deux éléments expliquent aisément le souci des verriers de s'installer à même la forêt, au plus près de cette ressource qui leur est fondamentale. Le transport du combustible sur de longues distances, peu aisé et fastidieux, engendrait des coûts élevés. Aussi, celui-ci ne devint-il intéressant et concurrentiel qu'avec l'amélioration du réseau de transport, la route par exemple, puis le rail. Cela est d'autant plus vrai dans des régions périphériques au relief mouvementé comme l'arc jurassien. Ainsi, à la fin du 18<sup>e</sup> siècle, la verrerie dite de Roches (Rebeuvelier JU) se voit-elle implantée en bordure d'une chaussée d'importance régionale qui relie le bassin rhénan au sud de l'évêché de Bâle, par la plaine delémontaine<sup>96</sup>. Cette manufacture qui demeure assez traditionnelle dans son fonctionnement, puisqu'elle chauffe au bois, semble tirer parti de l'infrastructure routière pour l'acheminement du bois, l'importation des salins et l'exportation de sa production.

### 2.1.6.1 Essences

La question des essences ligneuses utilisables ou utilisées dans la production de verre a été abondamment discutée dans les traités verriers et la littérature spécialisée. Il importe de distinguer deux usages différenciés: la production de cendre et le bois de chauffe. Nous avons vu (voir chap. 2.1.2.1) que pour la cendre, d'aucuns préconisent l'utilisation exclusive de hêtre et que d'autres ne voient aucun inconvénient à utiliser des végétaux de toute origine. Pour le bois de chauffe, la question se pose d'une manière un peu différente dans la mesure où différents paramètres influent sur le feu et sa conduite. Toutes les essences n'ont pas le même pouvoir calorifique; autrement dit, elles ne libèrent pas la même quantité d'énergie thermique. Loysel invite à ne pas mélanger les différentes essences, car elles ne réagissent pas toutes de la même manière: certaines brûlent lentement comme le chêne, d'autres forment des flammes vives à l'instar des résineux<sup>97</sup>, qui au surplus produisent beaucoup de cendres. Le hêtre a de tout temps eu les faveurs de la cote, aussi est-il prescrit par la plupart des ouvrages consacrés à la fabrication du verre.

Un paramètre reste toutefois valable pour l'ensemble des combustibles ligneux utilisés en verrerie: le degré de siccité, de sécheresse. L'usage d'un bois mal séché, légèrement humide, provoque un développement de fumée et crée de la vapeur d'eau et des gaz qui abaissent la température interne du four tout en modifiant la composition de son atmosphère. La présence de fumée diminue le volume d'oxygène dans le four et y rend l'atmosphère réductrice, ce qui influe sur la couleur et la transparence du verre.

### 2.1.6.2 Consommation

Dans le chapitre relatif à la cendre, nous avons vu que les verreries forestières consommaient d'énormes quantités de bois. Les techniques d'exploitation radicales consistent en un déboisement complet par portion de forêt, au point qu'après quelques années, les flancs des montagnes sont dénudés. Mais c'est sans doute l'idée de gaspillage qui sous-tend les vives réactions de la population, qui ressent comme un énorme gâchis la réduction en cendre des pans

96 Bélet-Gonda/Évéquoz/  
Eramo 2007, 316, 319-320.  
97 Loysel 1799/1800, 67-71.

verrerie	année	usage	quantité de bois mentionnée	équivalence en stères	durée d'exploitation	volume st/mois	sources
Fournet, Blancheroche (FR)	1769	four	250 cordes charbonnières / an	1185	3 mois?	395	Michel 1989, 199 n. 3.
Biaufond JU	1779	four	200 cordes de verrier / an	1720	3 mois?	573	Michel 1989, 199 n. 4.
La Vieille-Loye (FR)	1783	four	2400 cordes / an	6576	12 mois	548	Michel 1989, 199 n. 7.
Flühli LU	1769	verrerie	800 klafter / an	4860	ca. 20 semaines	972	Horat 1986, 53.
Flühli LU	1769	quatre fours	40 klafter / semaine	240	ca. 20 semaines	960	Horat 1986, 53.
Flühli LU	1769	four de fusion	25 klafter / semaine	150	ca. 20 semaines	600	Horat 1986, 53.
Ballens VD	1735	four	5 toises / jour	13	?	390	Pelet 1992, 265.
Gimel VD	1738	four	6 toises / jour	16	?	480	Pelet 1992, 265.
Schangnau BE	1760	four	2000 Bergklaffter / 2 ans	7040	24 mois	293	Schenk 1981, 111.

Les conversions tiennent compte des variations régionales des différentes unités considérées : corde charbonnière à 4,74 st ; corde valant 8,6 st en Principauté de Porrentruy ; toise de Berne à 2,65 st(?) et Bergklaffter valant 3,7 st.

Fig. 7 : Comparaison de la consommation de bois dans différentes verreries du 18<sup>e</sup> siècle.

entiers de forêt (voir chap. 2.1.2.3 et suivants). La consommation dépend aussi du type de production : le vitrage consomme plus que la gobeletterie, car la température du four y est plus élevée<sup>98</sup>.

L'ingénieur forestier Heinrich Grossmann rapporte quelques chiffres relatifs à la consommation effrénée des verreries forestières et indique qu'encore au 19<sup>e</sup> siècle, 100 m<sup>3</sup> de bois étaient nécessaires à l'obtention de 100 kg de verre. Selon lui, 180 m<sup>3</sup> de bois frais fournissaient 100 kg de « reiner Pottasche », soit de cendre lessivée calcinée<sup>99</sup>. Ces chiffres remis en question par Hansjoerg Maus<sup>100</sup>, s'ils sont à prendre avec précaution, coïncident pourtant avec les valeurs obtenues en laboratoire par Jackson/Smedley (voir chap. 2.1.2.3, note 66), pour autant toutefois qu'une petite correction soit faite. En effet, il conviendrait à nos yeux de substituer « stère » à « mètre cube ». Cette confusion fréquente n'est pas anodine : le mètre cube désigne le volume d'un arbre sur pied ou d'une bille, alors que le stère est l'unité de mesure standard du bois débité. En Suisse, depuis l'unification des poids et mesures au milieu du 19<sup>e</sup> siècle, le bois de chauffe est stéré, débité en quartiers d'un mètre, entassés sur une hauteur équivalente et une longueur variable.

D'autres sources permettent d'approcher les quantités de bois nécessaires au roulement d'autres verreries plus ou moins contemporaines (fig. 7). Michel indique que les verreries comtoises de la Vieille-Loye et de Miellin ont l'autorisation de couper respectivement 10, 20 arpents par année, soit 5 et 10 hectares de forêt. Vers 1730, Miellin est une manufac-

ture qui compte douze maîtres-verriers, dont la production est axée sur le vitrage (verre au manchon) et la bouteille. Dans la vallée du Doubs, la verrerie de Blancheroche consommait annuellement 250 cordes de bois ; des incertitudes liées aux unités de mesure utilisées rendent les calculs de volume très approximatifs<sup>101</sup>. Dans l'Entlebuch lucernois, un rapport d'inspection<sup>102</sup> révèle que les trois verreries (Romoos, Eggelenen, Sörenbergli) consomment chacune annuellement 800 toises (Klafter) de bois qui représentaient près de 4860 st. On apprend par ailleurs que le four de fusion y consomme à lui seul 25 toises (150 st !) de bois par semaine. Non loin de là, la verrerie bernoise de Schangnau nécessitait, selon un rapport écrit vers 1760, « zwey Tausend Bergklaffter » qui équivalent à 7040 st<sup>103</sup>. Michel Philippe a publié des valeurs comparables pour différentes verreries françaises du 15<sup>e</sup> au 17<sup>e</sup> siècle, sans qu'il soit toujours possible de distinguer entre des consommations annuelles ou étalées sur plusieurs années<sup>104</sup>.

Afin d'établir une comparaison fiable de la consommation de bois, il conviendrait d'étudier chaque cas dans le détail, de connaître le type de fabrication (gros verre, menu verre), la taille de la manufacture et le nombre de fours ; certaines possèdent parfois deux fours de fusion, comme Blancheroche ou Kragen. Le bois concédé sert, nous l'avons vu, tant à la production de cendres qu'au chauffage des fours ; la distinction entre ces deux parts reste souvent impossible à faire. Certaines entreprises auraient fort bien pu importer toute ou partie de la cendre et ainsi consacrer leurs coupes en priorité à l'alimentation des feux. Nous savons

98 AAEB Procédures civiles, Franches-Montagnes, 15 juin 1759, pt. 3 du règlement. Voir aussi le commentaire de Schwab (s.d.), 48.

99 Grossmann 1934, 250 ; chiffres repris plus tard dans Grossmann 1967, 161-162.

100 Maus/Jenisch 1998, 368.

101 Michel 1989, 174 et notes 3 et 4 : Michel utilise une corde valant 2,74 st que nous n'avons pas retrouvée. Dans le Doubs, la corde dite charbonnière pouvait, selon les sources, valoir 2,5/3,5/ 4,4 ou 4,7 st, autrement dit varier du simple au double !

102 Horat 1986, 53 considère une toise de 10 × 5 × 4,5 pieds.

103 Schenk 1981, 111. Ces chiffres pourraient se référer à deux ans de consommation, le bois devant être flotté, puis séché avant d'être mis en réserve.

104 Philippe 1998, 105-106.



par contre que le four de fusion de la verrerie de Flühli, très similaire à celui du Pâturage de l'Envers (voir vol. 1, chap. 2.2.3), consomme 150 st de bois par semaine, les petits fours annexes 20 st chacun<sup>105</sup>.

Les différents paramètres qui entrent en jeu compliquent singulièrement les calculs et la comparaison des consommations. La logique voudrait que le bois de chauffe soit tiré de troncs plus faciles à débiter et à refendre, et que le reste, grosses branches et frondaisons, ait été réduit en cendres. En outre, pour assurer des réserves suffisantes de bois de feu bien sec, il était nécessaire de prévoir de grandes coupes dès le début de l'exploitation. La durée de fonte constitue un autre facteur variable difficile à estimer lorsque les documents font défaut ; elle détermine clairement la consommation de bois. Des sources consultées, il ressort qu'une campagne devait durer en moyenne quatre à cinq mois. Entre deux campagnes, plusieurs semaines étaient consacrées à la réparation des fours, à la confection de creusets ou à l'acheminement de matières premières. Michel a démontré qu'au plus tard dès le milieu du 18<sup>e</sup> siècle, les campagnes s'enchaînaient allègrement souvent jusqu'en hiver<sup>106</sup>. Rien ne nous empêche d'imaginer un tel scénario au Pâturage de l'Envers, si ce n'est que les hivers souvent rudes dans ce coin de pays, à l'altitude de 820 m, pouvaient compliquer l'acheminement du bois, les déplacements des individus et le transport des marchandises. La froidure hivernale ne devait avoir une influence que marginale sur la chauffe des fours.

### Préparation du bois de feu

Le bois utilisé par les verriers devait être parfaitement sec sous peine de produire des effets indésirables au sein du four, nuisant à la production de verre : chute de température, production d'humidité et de fumée, etc. Aussi, il apparaît évident que différentes étapes étaient nécessaires avant que le bois ne puisse être jeté dans le four. Michael Cable<sup>107</sup> les a résumées ainsi :

- Abattage des troncs
- Ebranchage
- Débardage et transport des troncs et des grosses branches
- Écorçage et découpe en billes plus petites
- Séchage à l'air, si possible à l'abri

- Découpe en billons standardisés adaptés au four
- Séchage ultime dans la verrerie ou dans un four spécifique
- Combustible prêt à l'emploi

L'énumération ci-dessus appelle quelques remarques. La raison de l'écorçage suggéré par Cable nous échappe ; l'écorce est-elle source de fumée, même à l'état sec ? Nous n'avons pas trouvé d'autres précisions à ce sujet. Ensuite, le séchage à couvert est difficilement envisageable en extérieur au regard des volumes nécessaires. De surcroît, le bois est coupé à l'avance et le roulement s'opère sur deux ans : les billes façonnées une année ne sont enfournées que l'année suivante. Ceci nécessite la création de grandes réserves stockées à l'air libre, de préférence autour des bâtiments de production et en bordure de chemin, afin d'en garantir l'accès en tout temps. Mais la halle, de conception plus généreuse dès la seconde moitié du 17<sup>e</sup> siècle, possède au-dessus des fours un grand volume sous charpente appelé la *roue*, où étaient stockées les billettes avant enfournement. Cet usage, décrit dans les principaux manuels spécialisés, est parfois représenté dans l'iconographie<sup>108</sup>.

La gestion des coupes implique un travail régulier considérable qui occupait plusieurs bûcherons à l'année. Régulièrement, le bois sec devait être chargé et voituré à proximité de la halle. Les billons étaient donc pris en main à plusieurs reprises avant d'être enfournés. La taille des billettes était adaptée en fonction des fours. Georges Bontemps indique une longueur idéale d'environ 70 cm pour un four rectangulaire à ailettes, dont le foyer seul mesure 5,20 × 0,80 m. L'important, ajoute l'auteur, est d'obtenir des billettes bien sèches capables de « dégager promptement le plus de flamme possible sans fumée »<sup>109</sup>.

### 2.1.6.3 Le bois du Pâturage de l'Envers

Dans le cas de la verrerie du Pâturage de l'Envers, le périmètre amodié s'étendait « depuis le bas derrier Sairoche jusqu'à des bois marqué au haut entre le bois de la Beluay [La Bluai] appartenant à des Seigneurs de Solleure, et du costé de vent par un seresier marqué et des bornes plantez jusqu'au dit bois appartenant

105 Horat 1986, 53.

106 Michel 1989, 213-217.

107 Cable 1998, 325-326.

108 Voir fig. 200-202.

109 Bontemps 1868, 140 (four) et 171.

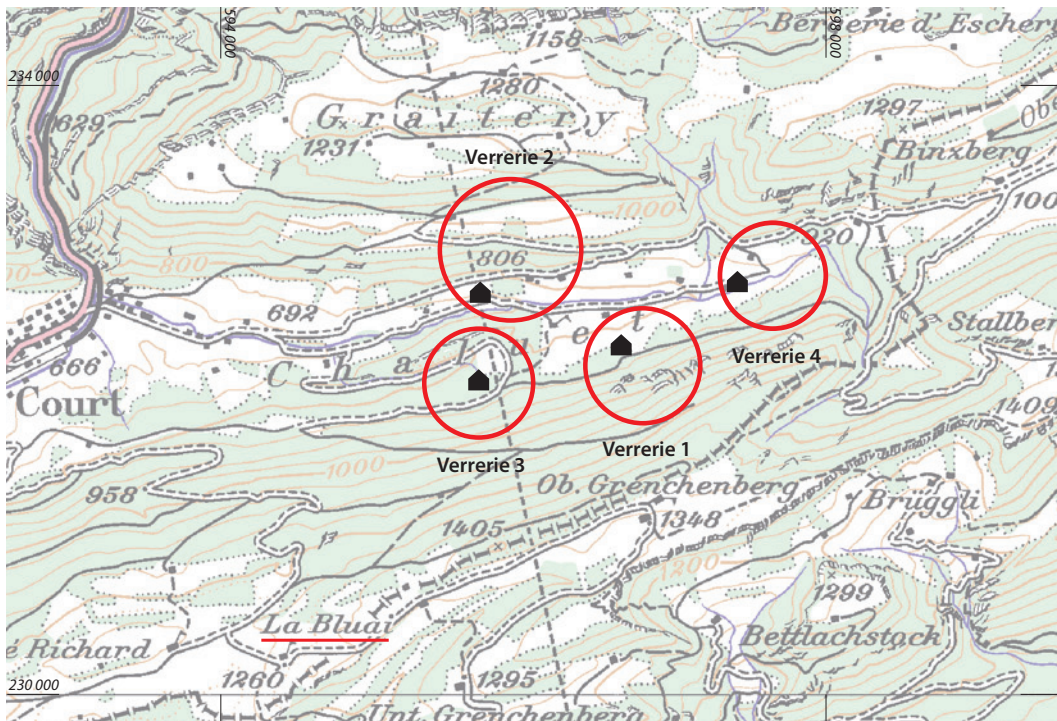


Fig. 8 : Cartographie de l'impact forestier minimal consécutif à l'exploitation de quatre verreries successives à Court, Châlet. Ech. 1: 50 000.

auxdits Seigneurs de Solleure, et le costé de vers bise tient jusqu'à la vielle verriere, et le bois qu'est du costé de vent par led[it] sersier et lesdites bornes plantés appartient auxdits Seigneurs de Chapitre seul (*sic*)<sup>110</sup>. Ces indications ne permettent pas de cartographier le périmètre concédé. Il existe aujourd'hui sur la crête du Montoz, à 200 m de la frontière cantonale soleuroise, une métairie qui porte le nom de La Bluai (fig. 8). Celle-ci permet de localiser approximativement l'extension occidentale et sud de la coupe concédée. Du côté nord, la limite nord s'arrête au « bas derrier Sairoche » que nous interprétons comme la zone de replat fermé par la barrière rocheuse de Sairoche, endroit où les verriers établirent précisément leur manufacture. A l'est, la démarcation est moins aisée à définir dans la mesure où la concession mentionne la « vieille verrerie » comme point de repère. Faut-il comprendre le site même des anciennes installations<sup>111</sup>, sans doute encore dans la mémoire des villageois, ou la limite occidentale du déboisement qu'elle engendra et qui demeurerait peut-être encore perceptible grâce au rajeunissement forestier ? Nous penchons plutôt pour la première hypothèse. Malheureusement, nous n'avons pas retrouvé le document d'amodiation original de la première verrerie, qui nous aurait peut-être rendu service dans l'établissement de cette li-

mite. La surface de bois concédé en 1699 reste ainsi difficile à appréhender. Mais nous avons vu (chapitre 2.1.2), que les seuls besoins en cendres fraîches de la manufacture du Pâturage de l'Envers (environ 10 t par an), auraient nécessité la coupe de 53 ha sur quinze ans, soit près de 3,5 ha par an. Les besoins en bois de chauffe viennent donc s'y ajouter. Sachant que le four de fusion de Flühli consommait 600 st par mois, ceux de Ballens et Gimel respectivement 390 et 480, on peut envisager des besoins en bois de chauffe similaires à Court. Une consommation mensuelle de 500 st répercutée sur une période de production de l'ordre de sept mois occasionne un déboisement de 7,5 ha<sup>112</sup>.

En totalisant le bois nécessaire à la production de cendre et celui destiné au chauffage des fours, on peut admettre que la verrerie du Pâturage de l'Envers dévorait bon an, mal an près de 11 ha de forêt. Après quinze ans d'exploitation, une large saignée correspondant à la superficie d'un disque d'environ 725 m de diamètre marquait le paysage. Ces surfaces nouvellement déboisées furent sans doute vite couvertes de verdure et prédestinées à la pâture, ce qu'elles ne manquaient guère de devenir, ainsi qu'en témoignent les lieux-dits Pâturage de l'Envers et Pâturage aux Bœufs qui ont traversé les siècles. En admettant, au vu

110 AAEB A55/24 Moutier-Grandval (Bois et forêts), 27 septembre 1699.

111 Il est fait référence ici à la première verrerie de Court active entre 1657 et 1673. Voir Gerber 2010, 27-28 et 35-36.

112 Voir notes 70. Il n'est ici pas tenu compte du houpier qui représente près de 525 st/ha.

de leur filiation étroite, que les quatre verreries fondées dans le Chaluët aient été de taille comparable et en appliquant la consommation annuelle estimée pour l'exploitation du Pâturage de l'Envers, nous sommes en mesure de proposer une cartographie de l'impact forestier minimal de cette industrie dans cette partie reculée de la vallée de Tavannes (fig. 8). Ces estimations tablent sur un rendement à l'hectare uniforme obtenu par coupe rase. Ainsi donc la première verrerie aurait-elle dû consommer près de 187 ha, la seconde environ 275, la troisième 165 ha et la dernière quelque 154 ha. Cela représente grosso modo pour chacun des établissements une surface forestière circulaire de 771, 935, 724 et 700 m de diamètre.

Ces énormes quantités de bois qui, année après année, doivent être abattues, élaguées, sciées, fendues, nécessitent évidemment une importante main d'œuvre. Si les sources archivistiques disponibles restent muettes sur ce point en ce qui concerne notre verrerie, elles fournissent néanmoins quelques chiffres pour d'autres installations contemporaines. Le Mémoire relatif à la verrerie de Schangnau, dans l'Entlebuch bernois, que rédigea David Sergeants en 1761, estimait que pour un roulement annuel continu, 30 scieurs et 10 refendeurs seraient nécessaires<sup>113</sup>; cela paraît assez considérable.

## 2.2 Préparation des matières

Traditionnellement, la cendre, qui fait office de fondant, est mêlée au sable, puis chauffée ou calcinée sur la sole d'un four ou d'une arche spécifique, tout en étant brassée de façon régulière. Cette opération provoque une première réaction des matières entre elles et initie une fusion d'une partie des composants; le produit obtenu se nomme la fritte (voir aussi chap. 3.3.4). Selon les auteurs, cette préparation liminaire dure plusieurs heures, voire une journée entière. Après refroidissement, le conglomerat obtenu est extrait du four, puis finement broyé avant d'être mis à fondre dans les creusets. Quoique le frittage de la composition soit déjà décrit par Pline et mentionné par l'ensemble des traités qui suivirent<sup>114</sup>, son application n'a pas forcément été systématique. Comme nous l'avons déjà relevé (voir vol. 1,

chap. 2.2.5), certains auteurs, dont Loysel<sup>115</sup>, mentionnent que la suppression de cette opération avait pour conséquence la présence de grains de sable dans la matrice vitreuse.

Dans les verreries jurassiennes et franc-comtoises, les femmes paraissent avoir joué un rôle important dans la préparation des compositions. Michel<sup>116</sup> cite à ce titre différents exemples: à Biau fond, la servante des Gygon préparait les matières pour le verrier Griner, alors que Jeanne Grässli, dont le patronyme trahit une origine verrière évidente, le faisait pour son mari, Jean-Pierre Plumey<sup>117</sup>. Cette participation directe des femmes à l'entreprise peut surprendre dans un premier temps. Mais le caractère « familial » ou « clanique » de l'organisation de ces verreries peut expliquer un partage des rôles et une intégration de l'ensemble des forces vives disponibles dans l'intérêt du bien commun. Toutefois, il n'est pas exclu que ce phénomène soit le fruit d'un développement tardif de la verrerie, en particulier dans les petites manufactures, peut-être en lien avec la diffusion écrite progressive des recettes verrières et la perte de leur caractère « secret ». Cette participation n'est pas évoquée par Michel Philippe qui souligne que jusqu'à la fin du 16<sup>e</sup> siècle, les « femmes n'ont pas le rôle technique des hommes »<sup>118</sup>. Tout au plus assument-elles, selon lui, un rôle économique dès lors qu'elles sont propriétaires d'une part de four, à la suite d'un veuvage par exemple. L'analyse des archives d'un espace géographique élargi permettrait sans doute de préciser le rôle des femmes dans le milieu résolument masculin de la verrerie.

### 2.2.1 Fusion de la composition

La fusion directe de la composition dans le creuset comporte un désavantage: le volume occupé par la cendre dans la charge se réduit à mesure que le processus de fusion avance, si bien que le verrier doit compléter le pot. Mais cette opération est la règle, puisque les verriers font fondre leur mélange par charges successives. Lorsque la première est fondue, la suivante est ajoutée; cette manière de faire contribue à accélérer le processus de fusion. Sur la base des données que nous lui avons soumises, Allain Guillot<sup>119</sup> propose le mode opératoire suivant pour notre verrerie. Pour obtenir les

113 Schenk 1981, 111.

114 Théophile, Biringuccio, Agricola, Neri, etc. Voir à ce sujet: Kurzmann 2004, 182-188.

115 Loysel 1799/1800, 160-161. Au 19<sup>e</sup> siècle, Benrath remet partiellement en question le frittage des compositions, dans le cas de matières premières épurées: Benrath 1875, 174.

116 Michel 1989, 226 et notes afférentes.

117 AAEB Audiences seigneuriales, Franches-Montagnes 2 juin 1753; Schwab (s.d), 31-32.

118 Philippe 1998, 282-283.

119 Verrier traditionnel, versé dans le verre historique, que nous remercions pour ses précieuses informations.



30 kg de verre contenu dans un creuset (voir chap. 5.8.2.1), les verriers opéraient par étape en enfournant probablement 7 kg de composition toutes les demi-heures. Après environ deux heures de temps, la composition était fondue, mais à ce stade, dix ou douze heures d'affinage sont encore nécessaires pour éliminer les bulles de la masse vitreuse. La durée d'affinement dépend de la qualité effective que le verrier recherche. Pour le verre commun à usage unique ou destiné au stockage par exemple, une qualité de verre inférieure semble aussi acceptable. Pour le service de table, la qualité supérieure s'impose plus volontiers. Les matières non fusibles, moins denses, surnagent en surface et sont écumées au moyen de louches. Lorsque le verre parvient à la consistance du miel liquéfié, le travail de soufflage peut débuter. En outre, Guillot précise encore que le groisil fond plus vite qu'une composition, mais prend apparemment plus de temps à s'affiner.

Un document de 1649 relatif à la verrerie badoise de Walkersbach (DE), publié par Lang<sup>120</sup>, nous livre encore quelques précieuses indications quant à l'organisation du travail et les temps de fusion. Ainsi y apprend-on que les verriers cessent leur activité après sept heures de travail, et remplissent les creusets avec du débris de verre (groisil) avant de dormir quelques heures. Lorsque le verre est fondu, le tiseur envoie un gamin réveiller les verriers pour qu'ils retournent à l'ouvrage.

## 2.2.2 Observations archéologiques

Les vestiges archéologiques du Pâturage de l'Envers ont été présentés dans le volume 1 (voir Gerber 2010). Contrairement à d'autres sites, comme celui de Glaswasen (DE) par exemple, la présence de fritte n'a pas pu être mise en évidence de manière définitive au Pâturage de l'Envers, et ce malgré une fouille fine opérée par décapage manuel. La découverte au sud du four A211 d'une série de strates grisâtres à noirâtres (A225), à texture sableuse-cendreuse, suggère une activité étroitement liée à la préparation des compositions. La présence, le long de la paroi orientale de la halle, d'une structure creuse allongée (A249) en forme de fosse et d'un aménagement associant de courtes poutres et un empierrement (A222a-c et A227) suggèrent l'existence de contenants (batterie de fûts ou caissons) destinés aux matières premières. La récupération des débris de verre (groisil) à des fins de recyclage est traditionnelle dans la verrerie; elle est en général organisée au niveau de chaque place de travail, des récipients ou seaux étant disposés à proximité des souffleurs. La récupération touchait les verres de toutes les teintes, mais de façon sans doute plus systématique encore, les verres issus de recettes particulières ou complexes (voir chap. 2.1.4). Ainsi en fût-il des verres incolores ou colorés au moyen d'oxydes métalliques ajoutés. Nous avons vu dans le chapitre susmentionné que l'ajout de groisil dans une composition favorise la fusion du mélange et réduit du même coup la consommation de combustible.

120 Lang 2001, 177-178.





### 3. Production de verre à Court, Pâturage de l'Envers

Christophe Gerber et Lara Tremblay

---



### 3.1 Introduction

La fouille d'un site verrier constitue un événement rare auquel peu d'archéologues ont la chance d'être confrontés. En Suisse, on ne dénombre guère plus de cinq ou six ateliers – toutes époques confondues – ayant fait l'objet d'une intervention archéologique<sup>121</sup> ces trente dernières années. Aussi existe-t-il quelques spécialistes du verre romain ayant étudié les structures et déchets de production de cette époque, mais pour les périodes du Moyen Age et des Temps modernes, nous sommes malheureusement moins bien lotis. Une connaissance préalable des problématiques inhérentes aux verreries et des axes de recherches aurait facilité une approche peut-être plus ciblée de certains aspects.

Il est évident que devant la masse de déchets et d'artefacts en verre jonchant le sol de la verrerie du Pâturage de l'Envers, l'auteur et responsable de la fouille a dû se résoudre à faire des choix dans la manière de collecter le mobilier archéologique afin que d'une part, la fouille puisse progresser à un rythme suffisamment rapide, respectant les délais impartis par l'aménageur, et que d'autre part, la qualité et la représentativité du matériel soit garantie.

### 3.2 Méthodes de collecte

En 2000, la première campagne de fouille fut celle de la découverte du site et de ses structures de production, mises au jour au gré des décapages. L'intervention au cœur même de la verrerie confronta immédiatement les fouilleurs et l'auteur à la réalité de la production : les sols étaient jonchés de débris de toutes sortes. Tessons de céramique, débris de verre de tout genre, fragments de terre cuite et de réfractaire vitrifié sautaient au moindre coup de truelle. Durant cette première campagne qui permit d'explorer un peu plus de 60 % de la halle et une partie du crassier principal<sup>122</sup>, la collecte fut systématique et ordonnée par unité stratigraphique, ponctuellement même par mètre carré (niveau de sol). En raison de l'abondance, mais surtout de la forte fragmentation de toutes les catégories matérielles, les principes de collecte ont été discutés au sein du Service archéologique, en particulier avec Adriano Boschetti-Maradi et Martin Portmann. Ainsi, décision fut prise dès la seconde campagne de fouille, de trier le mobilier selon une grille spécifique qui définissait les paramètres de sélection pour le verre et la céramique (fig. 9). Cette clef de tri ne fut pas

121 Augst BL, Kaiseraugst AG, Avenches VD, Flühli LU, Rebeuvelier JU et Court BE.

122 Zones 1 à 5 du secteur A. Un volume non fouillé estimé à 60 m<sup>3</sup> a été maintenu en réserve. Il repose aujourd'hui sous quelques mètres de remblais.

catégorie	type de matériel	2000	2001	2002	2003	2004
verre	déchets de production	tout	sélection individuelle	sélection individuelle	sélection individuelle	sélection individuelle
	meules	tout	tout, en principe	tout, en principe	tout, en principe	tout, en principe
	objets finis	tout	B, F év. P	B, F év. P	B, F év. P	B, F év. P
	objets filigranés et façon de Venise	tout	tout	tout	tout	tout
	vitrage circulaire : cives	tout	B, év. cœur	B, év. cœur	B, év. cœur	B, év. cœur
	vitrage plat : verres au manchon	tout	B, év. cœur	B, év. cœur	B, év. cœur	B, év. cœur
céramique	à recuire	tout	B, F ; P ≥ 3 cm*	B, F ; P ≥ 3 cm*	B, F ; P ≥ 3 cm*	B, F ; P ≥ 3 cm*
	domestique	tout	tout	tout	tout	tout
creuset	réfractaire	tout	B, F ; P ≥ 10 cm* ; pesage des tessons éliminés	B, F ; P ≥ 10 cm* ; pesage des tessons éliminés	B, F ; P ≥ 10 cm* ; pesage des tessons éliminés	B, F ; P ≥ 10 cm* ; pesage des tessons éliminés
brique	terre cuite	tri**	tri**	tri**	tri**	tri**
	réfractaire	tri**	tri**	tri**	tri**	tri**
métal	tout	tout	tout	tout***	tout***	tout***
os	tout	tout	tout	tout	tout	tout

B : bord ; F : fond ; P : paroi

\* Dans les ensembles clos (remplissage de cave d'habitation par exemple) la totalité des tessons a été en principe récoltée.

\*\* Triage sélectif en fonction de l'état de conservation. Pièces complètes ou offrant 2 à 3 côtés conservés.

\*\*\* Hormis les agrafes en fil de fer sélectionnées selon leur état de conservation.

Fig. 9 : Court, Pâturage de l'Envers. Grille de sélection du mobilier archéologique entre 2000 et 2004.



appliquée aux périmètres de fouille des habitations, considérés comme des ensembles clos susceptibles de comporter des pièces, dont le potentiel de remontage était plus élevé. En outre, le matériel fut collecté par unité stratigraphique et non plus par mètre carré, exception faite des objets numismatiques.

### 3.2.1 Verre

Les bords et les fonds furent systématiquement ramassés, car ils permettent d'établir une identification typologique fiable et un dénombrement qui autorise un traitement statistique. Les fragments de paroi de plus de 3 cm d'arête furent collectés, ainsi que tous les tessons ornés ou offrant des particularités, et les verres de couleur. Notons au passage que les tessons identifiés comme fragments de parois pourraient être confondus avec de simples restes de paraison soufflée. Au demeurant, ces tessons demeurent difficiles à attribuer à des individus précis. Parmi les pieds, nous avons conservé systématiquement les jambes en balustre, les tiges pleines et creuses. Pour le vitrage, nous avons usé des mêmes critères en conservant les bords des cives et des carreaux, ainsi que les fragments de plus de 3 cm. Les tessons ne correspondant pas aux critères de tri ont été rejetés sur la fouille même et n'ont malheureusement fait l'objet d'aucun décompte ni aucun pesage.

Dans la catégorie des déchets de production, les critères de sélection furent plus difficiles à établir. Si la première année tout fut conservé, par la suite on opéra une sélection subjective, probablement assez individuelle en fonction du fouilleur. Les principes établis consistaient à ramasser une variété significative des déchets selon leur forme (fils, rognures, verres bruts, débris scoriacés...) et leur couleur (par exemple vert, incolore, bleu, jaune...) afin d'obtenir un spectre le plus représentatif possible.

### 3.2.2 Céramique

Les creusets sont en général facilement identifiables grâce à leur pâte et à leurs surfaces intérieure et extérieure vitrifiées. Toutefois, sur notre site, ils peuvent être confondus avec des fragments de parois, en particulier des recharges peu épais, car ils sont réalisés dans la

même terre réfractaire. À partir de 2001, un tri sévère a en principe été pratiqué. Si les bords et les fonds ont été systématiquement conservés, les fragments de paroi dont l'arête maximale était inférieure à 10 cm ont été rejetés. Tous les creusets ont été pesés, ce qui autorise un travail statistique minimal.

Les pots qui servirent à la cuisson des verres après façonnage (voir chap. 5.9) ont subi le même sort que le verre : bords et fonds systématiquement collectés, parois à arête maximale inférieure à 3 cm éliminées, dans ce cas aussi sans décompte ni pesage.

Quant à la vaisselle domestique (pots culinaires, plats, assiettes, écuelles, etc.), elle a été conservée dans sa totalité dès la première campagne. Les pots à cuire et la vaisselle culinaire faisant l'objet d'une thèse de doctorat, ils sont publiés séparément dans le troisième volume consacré au site du Pâturage de l'Envers. Son auteur a accepté néanmoins d'intégrer dans le présent volume quelques considérations liminaires utiles à la compréhension des processus de cuisson (voir chap. 5.9), et nous l'en remercions.

### 3.2.3 Matériaux de construction

En raison de leur état de conservation souvent très mauvais, les matériaux de construction en terre cuite n'ont fait l'objet que d'une collecte ponctuelle. Fortement sollicitées par la chaleur, les briques des fours verriers s'étaient généralement délitées, voire désintégrées, déjà à l'occasion du démantèlement des installations par les verriers mêmes. Les rares pièces complètes ont été conservées, ainsi que celles qui présentaient deux faces opposées ou trois faces adjacentes permettant la mesure d'une dimension complète au moins. Quant aux parties de fours (ouvreaux, voûte), retrouvées au sein de la démolition, elles ont en général fait l'objet de prélèvements sélectifs. Les fragments plus conséquents, susceptibles d'avoir été en connexion, ont été prélevés et conditionnés en groupe afin de permettre des remontages. Cette méthode a notamment permis d'assembler et de reconstituer des parcelles de voûte ainsi qu'une série incomplète d'ouvreaux. L'habitation 1 a livré, au sein de la démolition, une concentration ponctuelle inhabituelle de briques de terre cuite de couleur rouge-orangé. Ces pièces qui

se rapportaient vraisemblablement à un four ou fourneau domestique ont été dénombrées et pesées avant d'être sélectionnées.

Parmi les matériaux de construction citons encore les tuiles. Quoique rares, très fragmentées et utilisées de façon détournée, elles ont fait l'objet d'un prélèvement systématique.

### 3.2.4 Métal

Le mobilier métallique, relativement abondant sur le site, comprend notamment des fragments d'outils (voir chap. 3.5), des ustensiles domestiques (couteaux, cuillères, ciseaux...), des éléments de vêtements (boutons, agrafes), mais aussi des objets numismatiques. Il a été collecté de façon systématique, à l'exception des fils de fer (agrafes) ayant servi à la réparation des pots en terre cuite. Pour ces derniers, seuls les exemplaires les mieux conservés ont été prélevés. Les outils verriers font l'objet d'une présentation succincte dans ce volume consacré aux aspects technologiques et sont traités de manière plus complète dans le catalogue commenté du volume 4.

## 3.3 Traitement, classification et étude des verres

Au total, durant les cinq campagnes de fouille, ce sont quelque 59 708 fragments de verre<sup>123</sup>, représentant un poids total de 152,6 kg, qui ont été prélevés et conservés (fig. 10). Il apparaît vain de vouloir distinguer entre des ratés de fabrication et des tessons d'objets finis, sachant que de surcroît une partie des tessons fut collectée afin d'être recyclée comme gro-sil. Par contre, une collecte plus systématique fut appliquée dans le cas des ensembles clos que représentent par exemple les caves des habitations ou l'étenderie.

Après nettoyage, les fragments ont été triés et répartis en cinq catégories principales : verre brut, déchets, débris de verre indéterminés, verre soufflé et verre plat. Chaque catégorie a encore fait l'objet d'un tri par couleur : vert, incolore, bleu, opaque, filigrané par exemple. Le verre incolore est en principe caractérisé par une parfaite transparence qui rappelle le cristal, mais il peut aussi avoir un aspect grisâtre,

voire jaunâtre ou rosé<sup>124</sup>. Les couleurs spéciales ou peu fréquentes ont été réunies sous la rubrique « autres ». Ensuite, après inscription du numéro d'inventaire<sup>125</sup> et pesage au moyen d'une balance électronique, les tessons ont été conditionnés dans des boîtes en carton. Les objets en mauvais état ou instables, qui présentaient des symptômes d'irisation, de corrosion ou de desquamation sévères, ont été ensachés dans des sachets à fermeture zip. Chaque boîte comporte une carte d'identification sur laquelle figurent les coordonnées du site, les références stratigraphiques et le numéro d'inventaire. Les résultats des décomptes et des pesages ont été introduits dans une base de données MS Office Access™ détaillée comportant treize critères d'identification combinables, avec jusqu'à sept critères de teinte.

L'étude des verres se déroule à deux niveaux distincts : le premier traite de l'ensemble des débris selon les cinq catégories principales déjà évoquées. Le second niveau d'étude se concentre sur les verres individualisés, c'est-à-dire les objets finis identifiés comme tels, et fait l'objet d'un chapitre dans un volume distinct, le quatrième de la série monographique consacrée au Pâturage de l'Envers. Toutefois, afin de livrer au lecteur, ainsi qu'au chercheur, une première impression des productions du site, nous présentons ci-après un panorama général des formes identifiées et bien représentées (voir chap. 3.4).

Les méthodes de prélèvement appliquées durant la fouille, si elles ne permettent pas de travailler à l'échelle du mètre carré, autorisent néanmoins une approche au niveau des zones (subdivisions internes des secteurs, voir fig. 1) et, au besoin, au niveau des couches archéologiques ou des unités stratigraphiques. Le traitement statistique des données couplé à l'analyse des répartitions spatiales contribue à mettre en évidence des concentrations de certains types de déchets ou des répartitions particulières, signes probables de processus de travail. Une approche plus détaillée, au niveau de chaque place de travail (ouveau) n'est malheureusement pas envisageable, en raison des modes de prélèvement évoqués plus haut. Une méthode de collecte plus précise, mais très gourmande en temps, aurait peut-être offert d'autres perspectives d'étude. Mais sachant que les sols, parsemés de matériel archéologique, furent vi-

123 En comptabilisant les fragments d'écume et de « fritte », on atteint 62 374.

124 A l'origine, les verres présentant une légère teinte jaunâtre ou rosée avaient été interprétés comme des verres décolorés sciemment au moyen, par exemple, de manganèse. La caractérisation chimique de ces verres montre qu'ils ne se distinguent pas des exemplaires incolores et forment donc un seul et même groupe. En définitive, seule la dénomination incolore a été maintenue.

125 Le marquage s'est fait en partie à la main, à l'encre de chine, sur fond imprégné de Paraloid dilué à 10 % dans de l'acétone. Mais l'essentiel des tessons ont été marqués au moyen d'une imprimante à micro-jets de type Videojet, destinée à l'industrie.

nombre de fragments secteur	cives	feuilles*	calottes	bords	parois	fonds	total
A	6774	161	991	1754	1782	2846	14308
C	467	861	107	452	711	727	3325
D	42	147	15	25	36	82	347
E	5	2	1	7	10	13	38
F	4	24	2	7	10	10	57
G	12	4	2	8	17	14	57
H	3	1	1	10	13	15	43
I	5	151	1	14	45	14	230
K	22	0	0	1	1	2	26
L	0	0	0	1	1	0	2
M	0	0	0	0	0	2	2
N	0	0	0	0	0	0	0
tous	0	0	0	0	0	1	1
total général	7334	1351	1120	2279	2626	3726	18436
pourcentage du total	39,78	7,33	6,08	12,36	14,24	20,21	100

poids des fragments (g) secteur	cives	feuilles*	calottes	bords	parois	fonds	total
A	7189	348	1930	4586	4576	9744	28373
C	600	3403	330	1758	2384	4033	12508
D	57	179	24	40	90	286	676
E	4	9	0	37	89	83	222
F	9	55	10	30	56	103	263
G	16	31	1	20	44	125	237
H	3	5	2	35	45	122	212
I	10	648	2	186	556	410	1812
K	12	0	0	2	1	4	19
L	0	0	0	1	11	0	12
M	0	0	0	0	0	5	5
N	0	0	0	0	0	0	0
tous	0	0	0	0	0	11	11
total général (g)	7900	4678	2299	6695	7852	14926	44350
pourcentage du total (%)	17,81	10,55	5,18	15,10	17,70	33,66	100

\* Cette catégorie regroupe tous les fragments de verre obtenus selon la technique du manchon, y compris les ratés.

Fig. 10 : Court, Pâturage de l'Envers. Catégorisation des tessons de verre identifiés, collectés entre 2000 et 2004.

siblement entretenus et nettoyés au cours des années d'exploitation, le brassage des objets en devint inévitable et du coup s'avère moins représentatif dans sa répartition, les gros fragments étant emportés par le balai !

L'objectif poursuivi par cette étude est de tenter d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : l'espace de production étant partagé entre deux estrades, observe-t-on une différence sur la moitié nord et la moitié sud ? Les zones de rejet offrent-elles le même assortiment de débris ? Qu'en est-il de la question du recyclage du verre ? Est-il possible de le mettre en évidence ? Y a-t-il des traces de verres exogènes ? Les débris vitreux de l'espace habité se distinguent-ils de ceux de l'espace de production ?

Quoique les déchets de verre se concentrent logiquement autour de la halle, on en

découvrit sur plusieurs milliers de mètres carrés, parfois même à plus de 100 m du lieu de production. Cette dispersion s'explique sans doute par l'occupation du site, mais aussi par l'activité et le déplacement des gens qui gravitaient autour de la manufacture. Dès lors, il nous paraît important de resserrer, au niveau de la halle et de ses abords immédiats qui ont servi d'espaces de rejet privilégiés, l'étude des stigmates de la production verrière. L'essentiel de l'analyse portera donc sur le secteur A, dans une moindre mesure sur le secteur C, en particulier la surface 7. Ponctuellement, des observations touchant d'autres secteurs compléteront les analyses. Ce choix s'explique aussi par les critères de tri établis dès 2001 (voir chap. 3.2) qui engendrent une perte d'information et une baisse de représentativité des secteurs fouillés dès 2002.



### 3.3.1 Verre brut

Le verre brut est constitué de fragments de forme souvent polyédrique, à fracture conchoïdale, dont l'apparence rappelle parfois le nucléus de silex. Il ne s'agit pas de lingots de verre, tels que nous les connaissons dans les ateliers primaires moyen-orientaux, mais de verre non utilisé, resté par exemple au fond du creuset, alors qu'il était retiré du four. L'expression « verre brut » peut porter à confusion, mais nous l'utilisons à défaut d'autre terme, car elle exprime bien son état non façonné. En général, les fragments de verre brut présentent une transparence suffisante permettant d'identifier la couleur à la lumière naturelle ou sous un spot. Lorsque leur surface est opacifiée ou couverte d'un voile laiteux, et rend ce jugement difficile voire impossible, il peut s'avérer utile de provoquer, par percussion ponctuelle, la chute de quelques petits éclats. On en trouve de différentes couleurs : vert, incolore, bleu avec naturellement des nuances dans leur intensité. Ces variations de teinte évoquent une production assez variée. En fait, nous verrons que la teinte verte domine largement et qu'elle constitue assurément le standard de la production.

Il arrive que les résidus vitreux moins épais, retrouvés sur les fonds de creusets, aient une apparence laiteuse, opaque, dont la couleur varie du blanc-crème au bleu-ciel. Comme ces teintes ne sont pas représentées parmi les mors ou le corpus d'individus soufflés collectés sur le site, nous devons admettre qu'il s'agit de déchets. Nous sommes d'avis que ces résidus-là reflètent plutôt du verre « surcuit » ou détérioré. L'opacification des verres peut aussi découler d'une contamination chimique liée au creuset ou plus vraisemblablement à l'atmosphère du four.

Dans la catégorie du verre brut, nous avons intégré les petits tubes de verre incolore, dont le cœur comporte une masse vitreuse blanchâtre, souvent riche en microbulles. Ces baguettes servaient à la confection de verres filigranés imitant les productions vénitiennes toujours appréciées au début du 18<sup>e</sup> siècle. La réalisation de telles imitations est attestée à Court, Pâturage de l'Envers par la présence au sein des débris, de déchets de production, tels les meules et les rognures.

#### 3.3.1.1 Données quantitatives et répartition spatiale

Tout en gardant à l'esprit les critères de prélèvements et de sélection mentionnés plus haut (chap. 3.2.1), on remarque que parmi les 1188 fragments de verre brut – d'un poids total de 13,2 kg – collectés dans les secteurs A<sup>126</sup> et C, près de 72 % sont de couleur verte (fig. 11-12 et 15). Le verre incolore représente un peu plus de 10 % et le bleu 2 %. Les autres couleurs, moins fréquentes, ne comptabilisent que 22 fragments, soit 1,9 % des débris de verre brut. Quant aux baguettes ou tubes destinés à la confection de verre filigrané (fig. 13-14 ; chap. 4.2.4.2), ils forment un ensemble de 163 pièces, dont 133 proviennent de la halle. Cette surreprésentation n'est pas significative : elle s'explique par le caractère particulier du produit et surtout par sa forme : plusieurs dizaines de tubes sont nécessaires à la confection d'un seul verre. Cet ensemble ne pèse que 155 g, soit un petit pourcent du verre brut collecté de manière sélective.

Le secteur A concentre à lui seul près de 95 % des déchets de verre brut récoltés sur le site, ce qui s'explique aisément puisqu'il couvre la halle et ses abords immédiats. La répartition spatiale des fragments révèle quant à elle quelques concentrations dans les zones 1 et 5 du crassier occidental, ainsi que dans la zone 4.3, en périphérie nord du four de fusion. La moitié orientale du secteur A a livré moins de verre brut, mais cette image déformée pourrait être due à la fois à une collecte moins exhaustive des débris vitreux informes de la part des fouilleurs durant la seconde campagne de fouille et à l'instauration des critères de prélèvement, dont nous avons déjà parlé.

Quant aux baguettes destinées au verre filigrané, elles se concentrent principalement dans les zones 8 et 9 du secteur A, avec respectivement 79 et 18 fragments. Ces deux zones constituent des espaces de rejet secondaires en légère pente, au nord-est de la halle, non loin de l'habitation 2. De telles baguettes sont également apparues dans le secteur C, sur la surface 7 et dans le comblement de cave des habitations 2 et 3 qui en ont fourni respectivement 11 et 15 fragments. Ces mêmes remplissages ont en outre livré quelques gros fragments de verre brut : bleu et vert pour l'habitation 2, vert

126 Pour rappel, le secteur A comprend l'ensemble de la halle verrière, ainsi que sa périphérie immédiate ; il englobe notamment l'ancien secteur B (partie orientale de la halle).

et incolore pour l'habitation 3. L'association de ces déchets particuliers retrouvés dans le comblement des habitations avec les verriers qui les occupaient reste hypothétique, mais vraisemblable, même si aucun débris similaire n'a été découvert sur les sols de cave.

### 3.3.1.2 Commentaire

La catégorie que nous avons dénommée « verre brut » comprend les résidus de matière vitreuse restés au fond des creusets et non utilisés par les verriers. Ces débris n'ont pas été collectés de façon systématique au cours de la fouille. On peut penser que les éléments bien affinés et d'une certaine qualité, en particulier ceux de couleur, ont été récupérés en vue de leur incorporation sous forme de groisil dans une nouvelle composition (voir chap. 2.1.4). On constatera avec intérêt la présence de petits blocs de verre à proximité ou dans le comblement des habitations, sans que l'on puisse affirmer avec certitude qu'il s'agisse de témoignages d'un stockage volontaire de blocs de groisil dans les habitations.

### 3.3.2 Déchets

Jusqu'à l'avènement des verreries industrielles du 19<sup>e</sup> siècle, caractérisées par une standardisation des produits et une grande maîtrise de la chaîne opératoire, y compris des compositions, la production des « huttes » verrières était tributaire de différents facteurs souvent difficiles à maîtriser : citons pour exemple le choix des sables et des fondants, la nature et la qualité du combustible (bois), les connaissances très empiriques des processus de fusion, les habi-

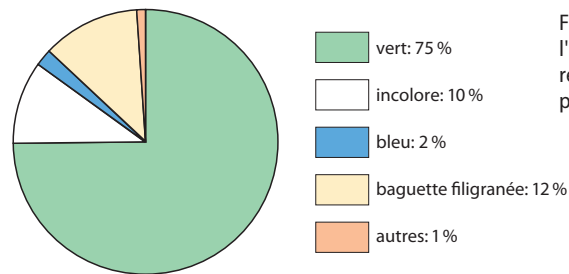


Fig. 11 : Court, Pâturage de l'Envers. Secteur A : taux de répartition du verre « brut » par couleurs.

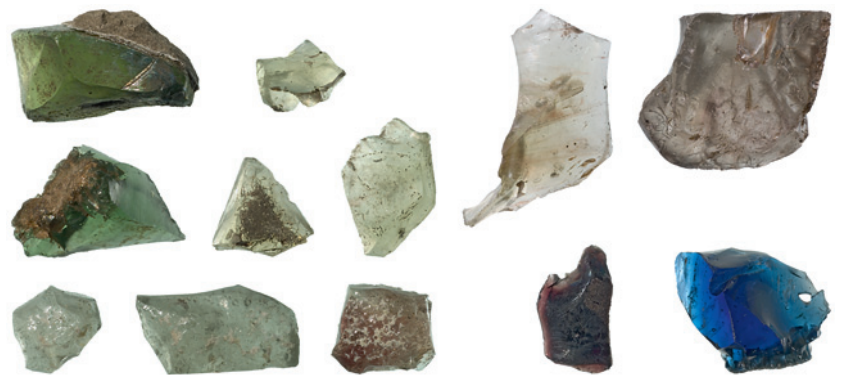


Fig. 12 : Court, Pâturage de l'Envers. Sélection de quelques fragments de verre « brut » de différentes couleurs retrouvés sur le site. Ech. 1:3.

tudes et le savoir-faire propre à chaque verrier. L'ensemble de ces facteurs malaisés à gérer concourrait certainement à la difficulté d'obtenir une production de qualité régulière. Des processus mal maîtrisés engendraient d'importants volumes de déchets, pas toujours réutilisables, rejetés sur des crassiers et des aires d'épandage distribués autour de la halle. Ceci paraît d'autant plus vrai si les sources d'approvisionnement en sable sont accessibles, abondantes et peu onéreuses, à l'image des sites jurassiens qui fleurissent dès la fin du Moyen Age. L'existence de ces crassiers a facilité notre tâche de localisation des sites verriers de Court et ceux, moins connus, de Péry et La Heutte dans le Bas-Vallon de Saint-Imier.



Fig. 13 (gauche) : Court, Pâturage de l'Envers. Tubes destinés à la fabrication du verre filigrané découverts sur le site. Ech. 1:2.

Fig. 14 (droite) : Court, Pâturage de l'Envers. Détail de la coupe d'un tube destiné à la fabrication du verre filigrané. La matrice blanche opaque au centre est entourée de verre incolore. Cont. 78287. Ech. 5:1.

nombre		verre brut						déchets divers						meules					
secteur	zone	vert	incolore	bleu	baguette filigranée	autres	total	vert	incolore	bleu	filigrané	autres	total	vert	incolore	bleu	filigrané	autres	total
A	non stratifié	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	1	320	67	2	7	3	399	565	130	1	2	4	702	181	52	1	3	2	239
	2	50	8	0	4	1	63	1589	207	12	2	11	1821	537	95	1	4	1	638
	3	21	2	1	0	0	24	596	58	7	0	1	662	62	15	1	0	0	78
	4.1	0	0	0	0	0	0	44	3	2	0	0	49	19	2	0	0	0	21
	4.2	8	2	0	1	0	11	270	42	4	0	3	319	74	10	0	0	1	85
	4.3	175	4	9	4	0	192	6125	280	92	2	4	6503	1509	89	15	1	1	1615
	4.4	7	1	0	0	0	8	2256	182	18	2	3	2461	838	93	5	7	0	943
	4.5	0	0	0	0	0	0	28	4	1	0	0	33	6	0	0	0	0	6
	5	131	5	4	2	0	142	837	66	25	3	1	932	293	15	3	0	0	311
	6	6	4	0	3	0	13	146	49	8	3	3	209	108	21	1	3	1	134
	7	44	6	0	2	6	58	23	21	3	1	5	53	33	7	0	2	0	42
	8	7	6	4	79	1	97	119	73	6	3	8	209	143	35	1	3	0	182
	9	10	2	1	8	1	22	145	45	5	1	4	200	63	33	1	5	1	103
	10	1	0	0	18	0	19	138	117	7	4	25	291	186	62	1	4	8	261
	11	28	4	0	3	0	35	221	23	6	2	0	252	98	5	2	0	0	105
	12	5	0	2	0	0	7	96	13	17	0	3	129	66	4	3	1	1	75
	13	22	2	0	2	0	26	253	20	6	0	4	283	97	4	2	0	0	103
	sous-total	835	113	23	133	12	1116	13451	1333	220	25	79	15108	4313	542	37	34	16	4942
C	non stratifié	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0
	habitation 2	2	0	1	11	8	22	101	8	4	0	4	117	17	10	2	4	0	33
	habitation 3	6	3	0	15	0	24	54	13	0	0	2	69	13	6	0	2	0	21
	surface 5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
	surface 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	surface 7	6	1	0	4	1	12	56	7	3	0	0	66	6	10	2	0	0	18
	surface 8	0	4	1	0	1	6	3	1	0	0	1	5	1	0	0	0	0	1
	sous-total	14	8	2	30	10	64	215	31	8	0	7	261	37	26	5	6	0	74
D	habitation 1	5	0	0	0	0	5	2	1	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3
E		0	0	0	0	0	0	6	0	1	0	0	7	4	2	0	0	0	6
F		3	0	0	0	0	3	6	0	0	0	0	6	1	2	0	0	0	3
G	surface 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	surface 2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	surface 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	surface 4	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0
	sous-total	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	4	2	0	0	0	0	2
H	surface 9	0	0	0	0	0	0	6	2	0	0	0	8	1	1	0	1	0	3
I	habitation 4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
K		0	0	0	0	0	0	70	2	2	0	0	74	6	0	1	0	0	7
N	ch. 5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
total général		857	121	25	163	22	1188	13762	1369	231	25	87	15474	4364	576	43	41	16	5040
% du total		72,1	10,2	2,1	13,7	1,9	100	88,9	8,8	1,5	0,2	0,6	100	86,6	11,4	0,9	0,8	0,3	100

Fig. 15 : Court, Pâturage de l'Envers. Dénombrement et poids de l'ensemble des déchets de production (verre brut, déchets et meules) collectés par secteurs et zones.



poids (g)																			zone
verre brut							déchets divers						meules						
vert	incolore	bleu	baguette filigranée	autres	total		vert	incolore	bleu	filigrané	autres	total	vert	incolore	bleu	filigrané	autres	total	
0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	6	non stratifié
2103	469	21	5	15	2613		1737	424	1	2	7	2171	782	176	2	11	11	982	1
832	160	0	1	4	997		4876	600	36	4	33	5549	1999	312	11	12	2	2336	2
276	39	2	0	0	317		2124	191	118	0	15	2448	276	36	3	0	0	315	3
0	0	0	0	0	0		84	9	2	0	0	95	58	4	0	0	0	62	4.1
232	17	0	2	0	251		746	74	7	0	17	844	281	23	0	0	2	306	4.2
2760	96	152	3	0	3011		17287	874	334	2	7	18504	6457	214	64	3	10	6748	4.3
238	21	0	0	0	259		4271	410	34	10	9	4734	2404	225	25	19	0	2673	4.4
0	0	0	0	0	0		90	8	2	0	0	100	20	0	0	0	0	20	4.5
1674	30	35	5	0	1744		3114	199	90	3	1	3407	1251	42	6	0	0	1299	5
199	34	0	2	0	235		470	115	14	6	8	613	533	55	4	12	1	605	6
509	50	0	3	97	659		91	75	35	11	33	245	138	16	0	6	0	160	7
356	73	79	65	9	582		568	263	16	4	24	875	579	87	2	10	0	678	8
245	16	1	11	17	290		505	132	16	1	15	669	305	31	1	13	8	358	9
67	0	0	17	0	84		419	275	14	5	93	806	651	116	2	9	22	800	10
843	40	0	4	0	887		720	94	7	4	0	825	420	11	5	0	0	436	11
63	0	38	0	0	101		318	39	20	0	10	387	288	7	9	5	1	310	12
403	32	0	2	0	437		1039	79	33	0	9	1160	445	8	9	0	0	462	13
10800	1077	328	120	142	12467		38459	3861	779	52	281	43432	16887	1363	143	106	57	18556	sous-total
0	0	0	0	0	0		17	24	5	0	0	46	0	0	0	0	0	0	non stratifié
21	0	23	11	76	131		299	28	26	0	16	369	70	23	4	10	0	107	habitation 2
36	38	0	20	0	94		213	125	0	0	5	343	74	18	0	7	0	99	habitation 3
0	0	0	0	0	0		0	4	0	0	0	4	0	0	4	0	0	4	surface 5
0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	surface 6
97	260	0	4	2	363		191	17	5	0	0	213	42	29	7	0	0	78	surface 7
0	34	18	0	5	57		15	13	0	0	3	31	6	0	0	0	0	6	surface 8
154	332	41	35	83	645		735	211	36	0	24	1006	192	70	15	17	0	294	sous-total
55	0	0	0	0	55		12	1	0	0	0	13	0	16	0	0	0	16	habitation 1
0	0	0	0	0	0		34	0	2	0	0	36	14	17	0	0	0	31	
56	0	0	0	0	56		155	0	0	0	0	155	2	6	0	0	0	8	
0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	13	surface 1
0	0	0	0	0	0		6	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	surface 2
0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	12	surface 3
0	0	0	0	0	0		5	0	0	0	1	6	0	0	0	0	0	0	surface 4
0	0	0	0	0	0		11	0	0	0	1	12	25	0	0	0	0	25	sous-total
0	0	0	0	0	0		38	15	0	0	0	53	5	2	0	1	0	8	surface 9
0	0	0	0	0	0		2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	habitation 4
0	0	0	0	0	0		109	1	3	0	0	113	17	0	5	0	0	22	
0	0	0	0	0	0		6	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	ch. 5
11065	1409	369	155	225	13223		39561	4089	820	52	306	44828	17142	1474	163	124	57	18960	total général
83,7	10,7	2,8	1,2	1,7	100		88,3	9,1	1,8	0,1	0,7	100	90,4	7,8	0,9	0,7	0,3	100	% du total

Fig. 16 : Court, Pâturage de l'Envers. Exemples de meules vertes, incolores, bleues et incolores filigranées de blanc. Ech. 1:1.



La catégorie des déchets de fabrication comporte l'ensemble des fragments de verre, souvent informes, produits et éliminés au cours de l'élaboration des objets jusqu'à la mise à l'arche. Nous y distinguons trois sous-ensembles :

- les meules, qui se rapportent aux résidus vitreux adhérent à la canne après soufflage ;
- les autres déchets de production qui regroupent principalement des fragments de verre découpés ou rejetés au cours du travail d'une pièce ;
- l'écume, une sous-catégorie particulière de déchets éliminés au cours de l'affinage de la masse vitreuse contenue dans le creuset.

### 3.3.2.1 Meules

La meule correspond au reste de verre, plus ou moins épais et cylindrique, qui adhère au mors de la canne de soufflage après la séparation de l'objet. C'est un déchet caractéristique de la production de verre par soufflage, qui reflète non seulement la couleur des verres produits, mais aussi les calibres des cannes utilisées (fig. 16-17). Après chaque opération de soufflage et une fois l'objet détaché, la canne est nettoyée et débarrassée des résidus vitreux qui adhèrent encore à son extrémité. Cette manipulation s'effectue en principe de manière mécanique, par grattage, après que la canne ait été refroidie ou trempée dans un bac d'eau

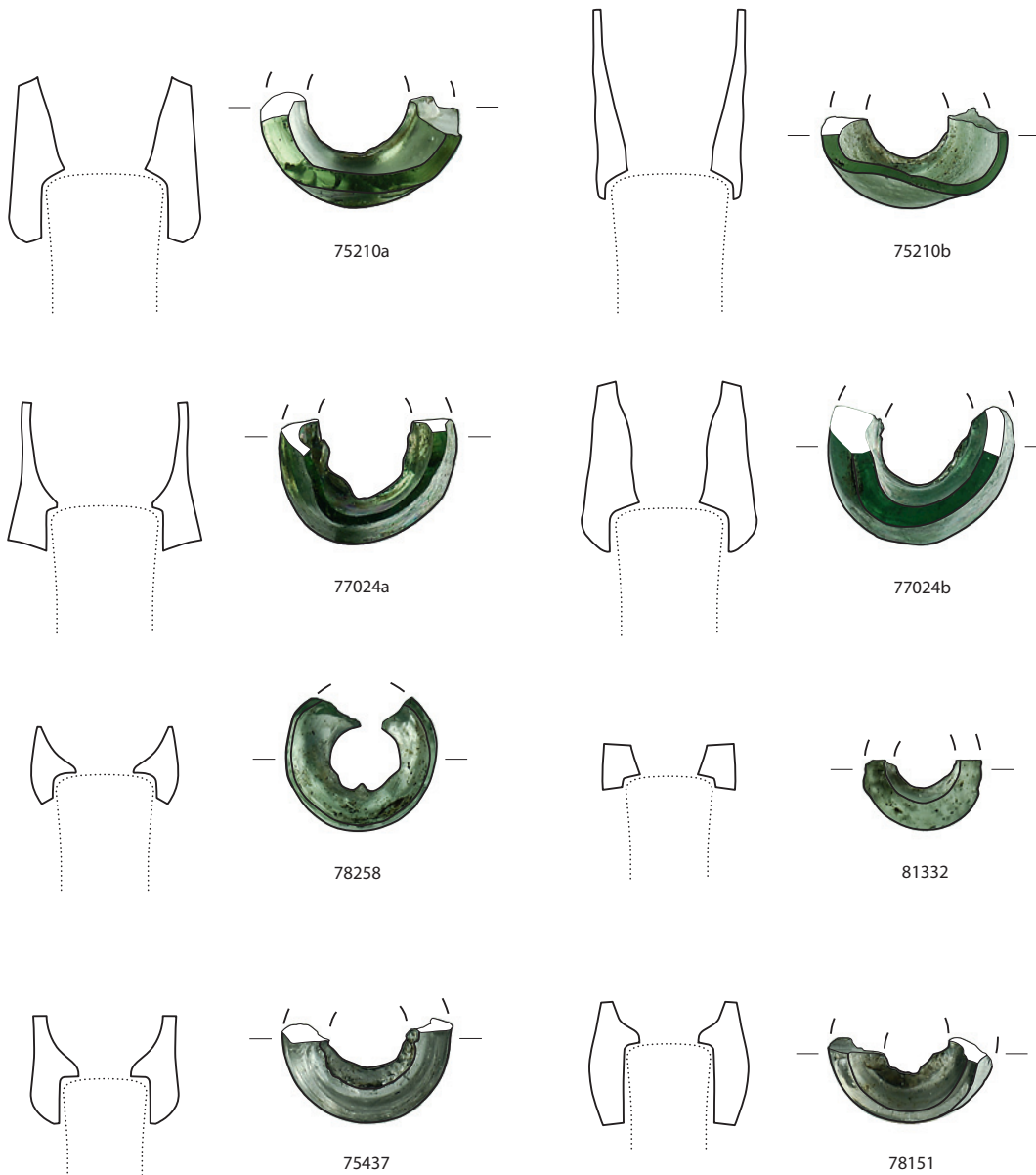


Fig. 17 : Court, Pâturage de l'Envers. Planche représentant quelques fragments de meules de diamètre variable. Ech. 1:1.

(fig. 18). Il n'est pas rare que lors de cette opération des parcelles de métal restent collées au verre<sup>127</sup>. Le refroidissement du verre provoque des tensions et favorise la formation de microfissures qui facilitent le nettoyage des cannes et ferrets au moyen d'outils tranchants. Par contre, il s'ensuit une forte fragmentation des meules, tant et si bien que les pièces sont parfois difficiles à identifier et leurs diamètres, pas toujours restituables. Il arrive que les meules soient récoltées et stockées avec les autres débris de production pour former ce qu'il est commun d'appeler le casson ou groisil. Antoine Allut<sup>128</sup> précise à cet égard que « dans les fabrications soignées, on sépare aussi très exactement tous les cassons qui ont éprouvé le

contact trop immédiat des outils : tels sont les mors de canne [...]. Les parties métalliques, que le verre auroit entraînées avec lui, terniroient la couleur du verre blanc dans lequel on feroit entrer de semblables cassons, aussi réserve-t-on les mors de cannes, pour des fabrications plus communes (sic) ». L'auteur use ici du terme « mors », alors qu'il fait référence aux meules de verre ; cette confusion est récurrente et apparaît dans de nombreux ouvrages. Il n'est pas impossible que les verriers mêmes aient parfois utilisé tantôt l'un, tantôt l'autre terme.

Les meules collectées sur le site ont été groupées par couleurs, puis simplement dénombrées. Leur orientation n'est pas toujours

127 Bontemps 1868, 108.

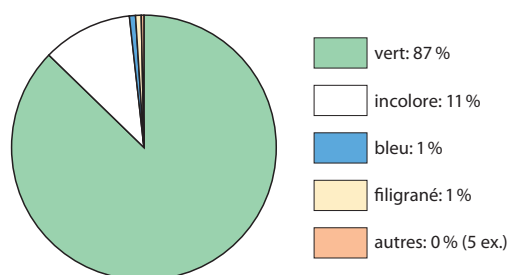
128 Allut 1791, 440. Allut fils fut directeur de la verrerie de Rouelles (Haute-Marne), fondée en 1759 par son père. Il rédigea les articles Verre (art du) et Verrerie (Art de la) de l'Encyclopédie méthodique publiée par Panckoucke. La signature de cette dernière contribution est mal orthographiée: Alliot au lieu de Allut. La partie consacrée aux glaces coulées fut reprise dans l'Encyclopédie de Diderot. Viard 2002, 175 et 178; Michaud 1843, 505; Hoefer 1852, 168-169.



Fig. 18 : Court, Pâturage de l'Envers. Verrier nettoyant le mors de sa canne pour en détacher les résidus de verre (meule). Diderot/D'Alembert 1772/2002, *Verrerie en bouteilles*, pl. VII, fig. 2 et 3.



Fig. 19 : Court, Pâturage de l'Envers. Secteur A : taux de répartition des meules par couleurs principales.



aisée, car les empreintes de canne, parfois discrètes, restent difficiles à identifier. En raison du nombre élevé de mors métalliques retrouvés, nous avons renoncé à mesurer de façon systématique les meules<sup>129</sup> ; ces extrémités livreront les enseignements utiles et nécessaires à l'appréciation des différents types de cannes utilisées (voir chap. 3.5.1.1).

### Données quantitatives et répartition spatiale

Durant les travaux de décapage, les fouilleurs avaient pour consigne de porter une attention particulière aux meules et de les collecter systématiquement, en raison des informations spécifiques qu'elles pouvaient fournir quant à la couleur des verres produits d'une part, mais aussi des modèles de cannes utilisées (diamètre et forme). Au final, le site du Pâturage de l'Envers a livré 5040 fragments de meules représentant un poids total de 18,96 kg, soit un poids moyen unitaire de 3,76 g. Les meules représentent 8 % du matériel collecté et près d'un quart des déchets relevés. La quasi-totalité (98 %) provient de l'espace incluant la halle verrière (secteur A), dépotoirs compris, ce qui

n'est pas une surprise. Des concentrations particulières apparaissent dans les zones 2, 4.3 et 4.4 (fig. 15 et 19). La zone 2 paraît un peu surprenante, car elle coïncide essentiellement avec un espace extérieur à la halle et n'est pas proprement identifiable comme un crassier, mais plutôt comme un espace d'épandage et de circulation. Par contre, les zones 4.3 et 4.4 correspondent aux aires de travail associées aux estrades sud et nord ; les concentrations de meules s'expliquent ici par la proximité de l'activité de production. Les meules de couleur verte dominent largement, puisqu'elles représentent près de 86 % des pièces, suivies des meules incolores avec 11,4 %. Les fragments bleus, filigranés ou d'une autre couleur sont encore plus rares. Parmi les 41 exemplaires attestant le soufflage de verre filigrané, 34 proviennent de la halle ou de ses abords immédiats (secteur A). Au vu du faible corpus, une analyse de la distribution spatiale à une échelle plus fine est risquée et pas forcément représentative. Néanmoins, nous observons une concentration relative dans la zone 4.4, celle de l'estrade nord, avec sept fragments de mors filigranés, contre un seul pour l'estrade sud. Pouvons-nous pour autant en déduire que le ou les verriers soufflant le verre filigrané exploitaient un ouvreau au nord ? Cette hypothèse sera discutée plus bas au chapitre 3.3.2.4. L'absence de meules de verre opaque blanc constitue une surprise dans la mesure où des tessons de récipients de cette qualité sont attestés sur le site. Les déchets de fabrication manquent eux aussi dans une très large mesure, ce qui corrobore la première observation.

Ces pourcentages, établis sur la base des fragments retrouvés, reflètent bien la gamme de couleurs produites sur notre site : la prédominance de la teinte verte coïncide avec une fabrication de masse basée sur le verre commun. Le nombre de meules incolores suggère ici une production plutôt marginale qui nécessitait une élaboration des matières plus longue et peut-être aussi plus onéreuse. Cette observation vaut également pour les verres bleus ou de couleur moins fréquente, comme le violet. Quant au verre filigrané, le recyclage n'est pas envisageable en tant que tel, puisque les déchets sont composés de deux couleurs distinctes, tout au plus peut-on refondre le tout pour obtenir un verre moins clair. L'ajout de

<sup>129</sup> Ainsi, nous n'avons pas suivi la méthode d'analyse élaborée par Heidi Amrein dans son étude de l'atelier romain d'Avenches ; Amrein 2001, 22-30.

verre recyclé dans une composition neuve apporte quelques avantages en termes d'économie de matières (sable, fondant et combustible), mais aussi de fusion accélérée (voir chap. 2.1.4).

Ainsi que nous l'avons mentionné plus haut, les concentrations de meules dans la halle, à proximité même des estrades, révèlent que le nettoyage des cannes se pratiquait sur la place de travail. Cette tâche d'exécution aisée était réalisée par un aide, souvent un jeune, appelé gamin<sup>130</sup>. Un nettoyage des mors hors de la halle est peu vraisemblable, même si les quantités de déchets s'avèrent parfois importantes comme au nord, dans la zone 2. Cette situation trahit plutôt la pratique constante de rejet sur les crassiers.

Lorsqu'elles sont détachées de la canne, les meules se fragmentent en plusieurs morceaux, aussi bien verticalement, le long du tube métallique, qu'horizontalement, de préférence au niveau de l'embouchure du mors. La majorité des fragments ne livrent guère d'information car ils n'offrent qu'une empreinte partielle de la canne et rendent la mesure du diamètre difficile. A cela s'ajoute la lente déformation des mors sous l'effet de la chaleur et leur tendance à devenir ovale<sup>131</sup>. Afin d'obtenir un spectre général des diamètres de cannes utilisées, nous avons pris le parti de ne mesurer que les pièces fiables qui présentaient une empreinte de mors propre. La sélection s'est opérée de façon aléatoire au sein des lots les plus fournis. En tout, 85 pièces ont été mesurées (fig. 20). Le diamètre le plus fréquent atteint 15 mm, suivi de 14 et 18 mm. Des diamètres plus rares (12 et 22 mm) paraissent aussi exister. Mais il convient de ne pas perdre de vue le facteur déformation déjà évoqué. Un mors ovale laisse une empreinte irrégulière qui peut aisément occasionner une variation de l'ordre d'un millimètre. De toute évidence, le diamètre des cannes utilisées variait en fonction du type d'objet soufflé, en particulier du volume de la paraison cueillée. Plus la paraison était grande, donc lourde, plus la section de la canne devait être conséquente, afin de ne pas ployer sous l'effet du poids.

Enfin, il n'est sans doute pas inutile de rappeler que les meules collectées ne reflètent qu'une part des résidus rejetés. L'essentiel a probablement été éliminé sur les crassiers prin-

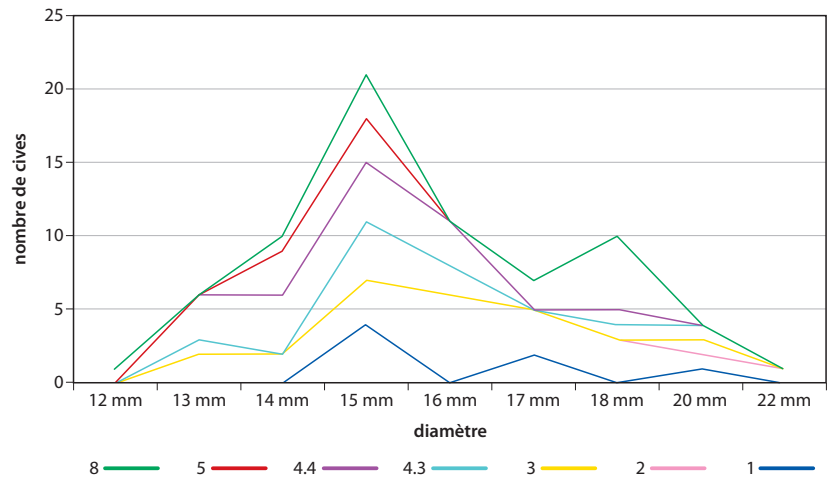


Fig. 20 : Court, Pâturage de l'Envers. Cannes à souffler : éventail des diamètres de mors mesurés sur des meules de verre. Valeurs obtenues sur 85 spécimens strictement mesurables, issus de contextes choisis de façon aléatoire dans différentes zones du secteur A.

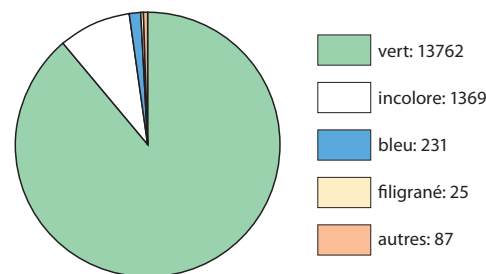


Fig. 21 : Court, Pâturage de l'Envers. Répartition des déchets (sans les meules) comptabilisés par couleurs tous secteurs confondus.

cipaux ou, dans une mesure moindre, été récupéré en vue d'une refonte. Les crassiers n'ont d'ailleurs pas été exploités dans leur totalité, puisque près de 60 m<sup>3</sup>, restés en latence, dorment aujourd'hui sous d'épais remblais.

### 3.3.2.2 Déchets divers

Dans cette sous-catégorie, nous regroupons l'ensemble des fragments de verre issus des différentes étapes du façonnage d'un objet (fig. 21-23), sans tenir compte des meules traitées ci-dessus. Après obtention d'une forme générale convenable, qui varie en fonction du produit fabriqué, la paraison soufflée est reprise au pontil. S'ensuivent différentes opérations : découpe, formage, ajout d'éléments de préhension, de pose ou de décor rapportés, etc. A chaque fois, un aide apporte au façonneur un peu de verre en fusion au bout d'une tige métallique ; l'excédent est découpé puis récupéré dans des baquets posés au sol. Mais il arrive que les déchets (rognures, fils, gouttes, etc.) tombent directement au sol, auquel cas ils doivent être lavés avant d'être éventuellement ajoutés à une nouvelle composition.

<sup>130</sup> Allut 1791, 539 et 545. Dans certaines verreries, les gamins chargés de nettoyer les cannes à souffler sont appelés « batteurs de cannes ».

<sup>131</sup> Communication de Lara Tremblay qui étudie le corpus métallique du site.

Fig. 22 : Court, Pâturage de l'Envers. Déchets de production : rognures et gouttes de verre vert, bleu, incolore et filigrané. Ech. 1:1.

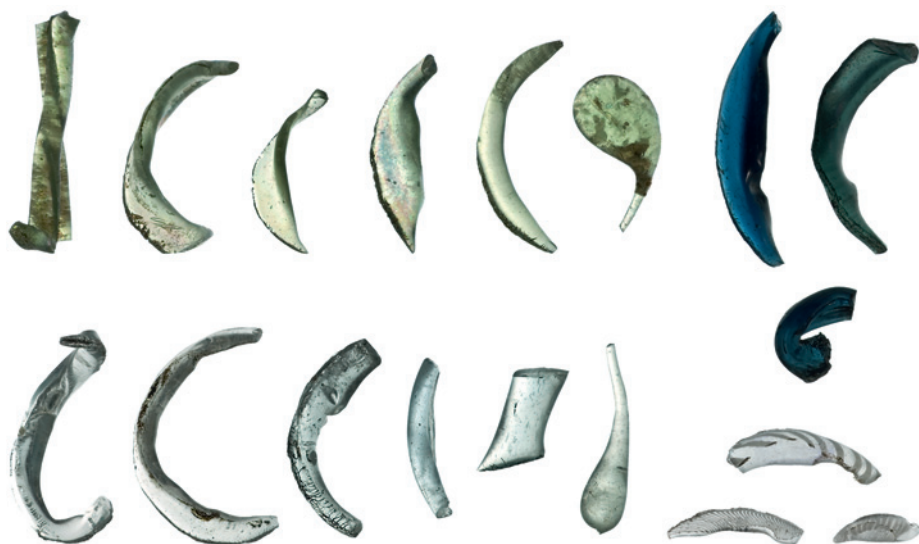


Fig. 23 : Court, Pâturage de l'Envers. Déchets de production : fils et filets torsadés, pleins ou creux, de diverses couleurs qui trahissent la réalisation de verre à la façon de Venise. En bas à droite, deux exemples de verre filigrané. Ech. 1:1.



Certains fragments portent des traces d'outil, en particulier de pinces. On en distingue principalement deux sortes : celles de section plate à extrémités en pointe et celles destinées à orner par gaufrage (fig. 24) des parcelles de verre rapportées sur un objet<sup>132</sup>.

#### **Données quantitatives et répartition spatiale**

Sur l'ensemble du site, les fouilleurs ont collecté 15 474 déchets de production représentant un poids total de 44,8 kg. Avec 88,9 %, le verre commun de couleur verte représente l'essentiel de la production. Nous trouvons ensuite le verre incolore avec 8,8 %, puis le verre bleu 1,5 %. Les autres catégories de couleur restent anecdotiques ou presque. De façon

générale, les zones 2, 4.3 et 4.4 du secteur A livrent l'essentiel des déchets divers toutes couleurs confondues (10 785 fragments, soit 71 % ; fig. 15) ; la zone 4.3 rend même 43 % des déchets du secteur, loin devant les zones 2 et 4.4, avec respectivement 12 et 16 %. En comparaison, la zone de l'estrade nord (zone 4.4) fournit 60 % de déchets en moins que son pendant sud (zone 4.3). Cette disparité s'avère valable tant pour la couleur verte que pour l'incolore et le bleu. Par contre, les zones de rejet nord et sud révèlent une tendance inversée avec la surreprésentation de déchets incolores au nord (zones 1 et 2), par rapport aux zones 3 et 5. Est-ce le fruit du hasard ou faut-il y voir le signe d'un rejet préférentiel vers les espaces d'épandage nord ? La logique de cette pratique, pour

<sup>132</sup> Ces pièces n'ont pas fait l'objet d'un décompte séparé.





Fig. 24 : Court, Pâturage de l'Envers. Exemples de traces laissées par des pinces à pointe et des pinces à gaufrer (à droite). Ech. 1:1.

autant qu'elle existât, nous échappe. En outre, il est intéressant de constater que 21 % des déchets incolores du secteur A proviennent de la prolifique zone 4.3, loin devant les 15 % de la zone 2. Enfin, on notera la très faible représentation de déchets filigranés, 25 fragments en tout et pour tout dans le secteur A, ce qui souligne le caractère très ponctuel, voire éphémère, de cette production. La réalisation de verres à boire, dont seule la jambe est en verre filigrané, peut expliquer en partie le nombre réduit de déchets retrouvés.

### 3.3.2.3 Ecume

L'écume est un déchet issu de la fusion de la composition dans le creuset, qu'elle soit préalablement frittée ou non. Appelée « fiel de verre » ou « suin » par certains auteurs<sup>133</sup>, elle est constituée pour l'essentiel de différents sels et d'éléments non fusibles qui migrent à la surface du verre fondu et que le verrier écrème au moyen « de poches ou de ceuillères de fer battu (*sic*) »<sup>134</sup>. En outre, Allut rappelle « qu'une précaution très essentielle, lorsqu'on tire du sel de verre, c'est de ne le toucher qu'avec des instruments secs, & de ne le déposer que dans des

vases aussi très-secs : on se sert pour ce dernier usage de baquets de fer de tôle : la moindre humidité fait faire au sel de verre très-chaud & et fluide des explosions dangereuses pour l'ouvrier (*sic*) ». Sous l'effet du refroidissement, la masse visqueuse se solidifie à la manière d'une lave jusqu'à former une manière de peau extérieure lisse, plus ou moins plissée. L'élimination de ces résidus contribue à l'affinage du verre. L'écume, qui constitue un sous-produit courant de la production verrière, n'a guère retenu l'attention des chercheurs. Son traitement ou même sa simple mention s'avère rare. Walter Lang, puis Sören Frommer et Aline Kottman<sup>135</sup>, lui ont consacré quelques chapitres dans leurs études respectives des déchets (Glasgalle) et sous-produits verriers de deux ateliers verriers médiévaux. Lang signale que l'écume, abondamment représentée sur le site de Salzwiesen (DE), est caractéristique des verreries fabriquant du verre commun à partir de cendre non purifiée<sup>136</sup>. Par contre, Kurzmann met en doute la découverte même d'écume sur les sites de production verrière en raison de la solubilité de ses composants, en particulier des chlorures et des sulfates<sup>137</sup>. De surcroît, il estime que la cendre végétale utilisée n'est

133 Allut 1791, 425 et 433 ; Fontenelle/Malpeyre 1898/1978, 165-166.

134 Allut 1791, 434.

135 Lang 2001, 96-97 ; Frommer/Kottmann 2004, 152, 160-163.

136 Lang 2001, 96 faisant référence à Engelmann et à l'encyclopédiste allemand Krünitz.

137 Kurzmann 2004, 195.



Fig. 25 : Court, Pâturage de l'Envers. Formée de résidus non fusibles, l'écume qui surnageait à la surface du verre en fusion était éliminée par écrémage. Ech. 1:1.

pas à même d'engendrer de sérieuses quantités de ce sous-produit. Sous-entend-il que les verriers n'utilisèrent que de la cendre lessivée, donc épurée ? L'abondance du verre commun, le « Waldglas » de nos collègues germaniques, tend plutôt à démontrer le contraire.

Sur le site du Pâturage de l'Envers, les fragments d'écume recueillis peuvent prendre différentes formes, du petit pois à la galette informe riche en bulles (fig. 25). Certaines pièces présentent une face très irrégulière qui trahit peut-être un contact à même le sol et ses aspérités. La matrice intérieure en partie vitrifiée en raison de la présence de silice, offre un aspect scoriacé, riche en vacuoles de différentes tailles. La teinte générale de l'écume, tant intérieure qu'extérieure, est grise ; certaines pièces prennent l'aspect d'une mélasse figée, dont la matrice vitreuse serait mal épurée. La plupart conservent dans leur corps des grains de silice non fondus parfaitement visibles à la loupe. Au fil de l'affinage du verre, la quantité d'écume

diminue. Après refroidissement, ces déchets tendent à former des « scories grises » légères et riches en vacuoles.

#### **Données quantitatives et répartition spatiale**

L'abondance de ce type de déchet sur la fouille du Pâturage de l'Envers, dans la halle derrière, mais surtout au sein des crassiers périphériques, confirme au besoin une production massive de verre commun à partir de cendres végétales non purifiées. Au vu des importants volumes en question, l'écume n'a été collectée de façon systématique que dans neuf unités tests d'un mètre carré chacune (fig. 26), réparties de manière homogène et symétrique sur le secteur de la halle fouillé en 2000. Six des neuf mètres carrés définis ont fait l'objet d'un tamisage complet jusqu'à la maille de 5 mm, les trois restants (unités 1 à 3) n'ont été exploités que partiellement. L'interruption du processus s'explique par des choix stratégiques et

des impératifs temporels: les objectifs d'une fouille de sauvetage différant de ceux liés à une intervention liée à un programme universitaire de recherche. Pour les trois cas interrompus, l'épaisseur totale du crassier a pu être définie avec une certaine précision grâce à la connaissance topographique fine du site, obtenue en fin de fouille, complétée par un certain nombre de sondages. Si bien qu'en combinant ces informations avec les résultats préliminaires des premiers décapages, le poids de chaque catégorie matérielle a pu être extrapolé; c'est cette estimation qui a été retenue dans l'analyse qui suit.

A partir du second décapage (Dok. Niv. 2), et hormis dans les carrés tests précités, l'écumé n'a plus été collectée de façon systématique, mais au cas par cas en fonction du contexte archéologique et/ou d'un aspect particulier. Une

large partie délaissée sur le site ne présentait qu'un intérêt limité ou sommeille encore dans les quelques 60-70 m<sup>3</sup> de crassier inviolés<sup>138</sup>. Dès lors, l'impression générale subit un biaisement certain.

Entre 2000 et 2004, plus de 111 kg de matériel scoriacé, identifiés comme de l'écume, ont été collectés, dont 107 la première année. Vu les conditions inégales de prélèvement, nous nous limitons à la discussion des décomptes opérés dans les mètres carrés tests. Les valeurs des poids obtenues montrent une relative homogénéité dans la dispersion des fragments, avec néanmoins une tendance à la concentration en dehors de la halle (fig. 27). Dans la zone 5, la valeur obtenue pour le mètre carré 3 paraît faible eu égard à la densité observée au cours de la fouille. N'a-t-on pas sélectionné plus de 61 kg d'écume dans cette zone,

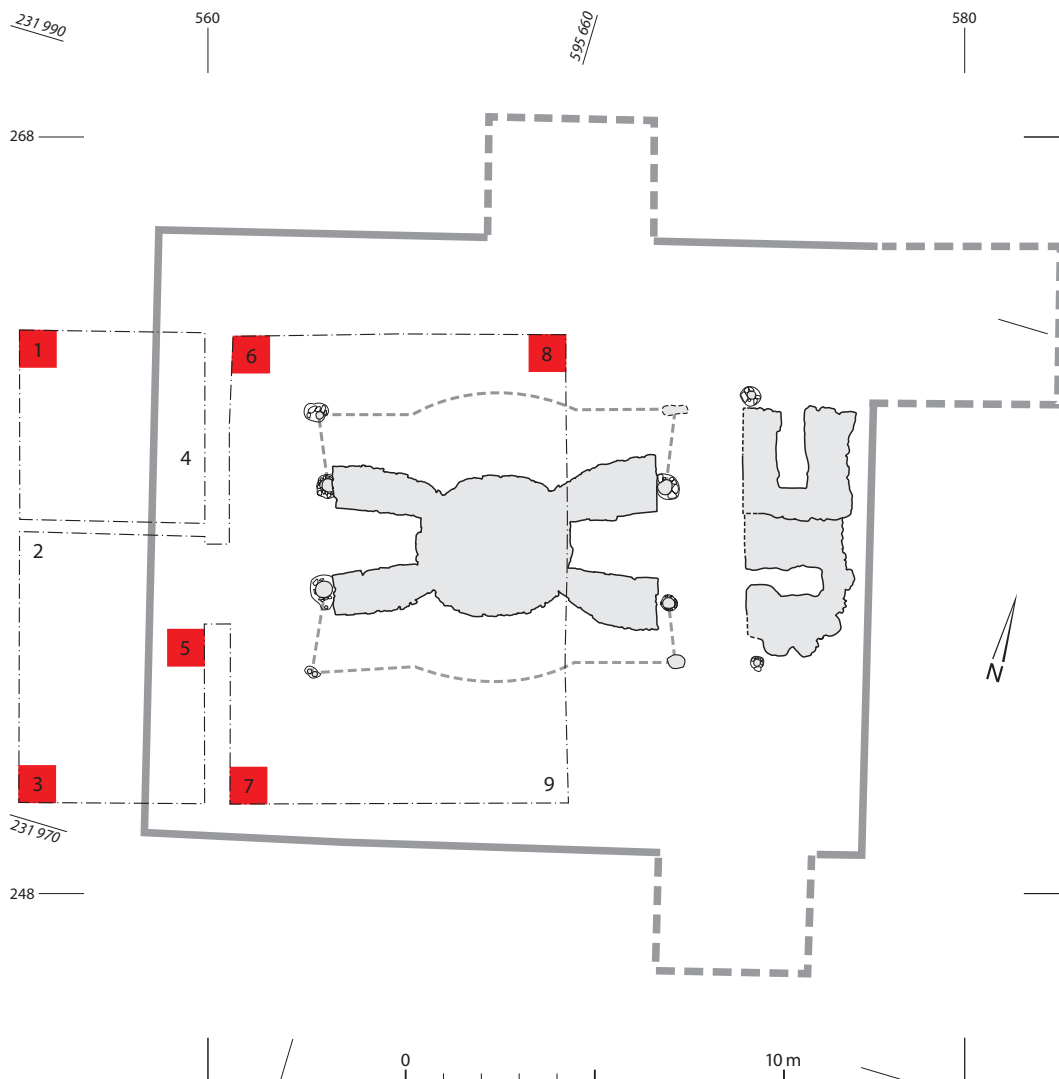
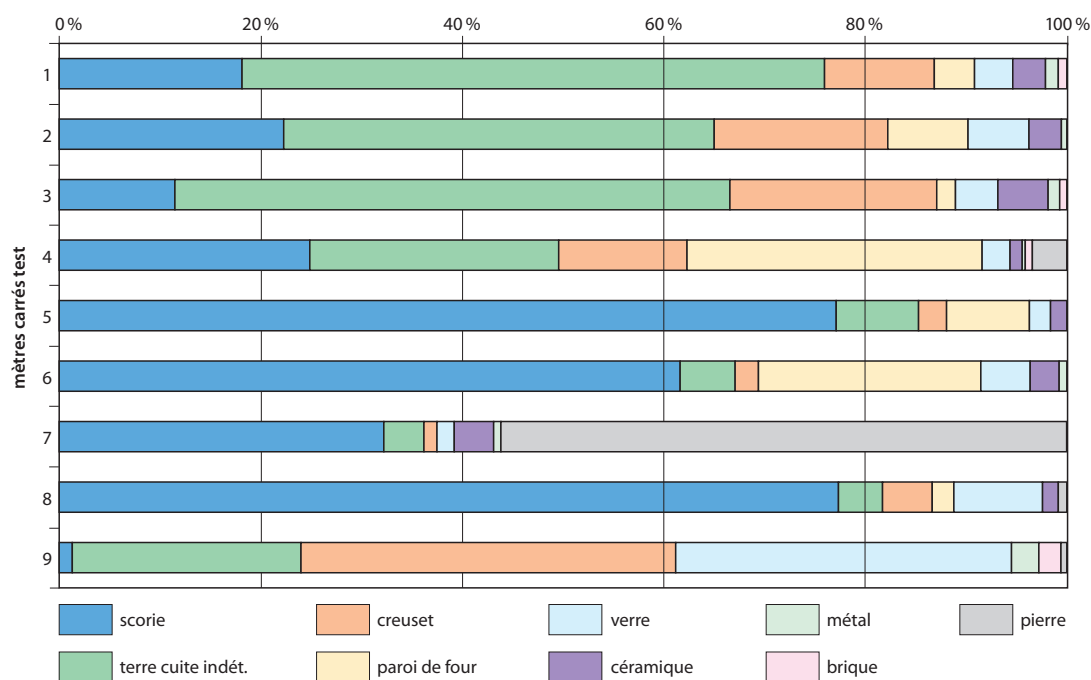


Fig. 26 : Court, Pâturage de l'Envers. Plan figurant l'emplacement des unités tests définies en 2000. Ech. 1:200.



Fig. 27 : Court, Pâturage de l'Envers. Taux de répartition pondérale des différentes catégories matérielles dans les unités tests 1 à 9. Une variabilité assez grande, difficile à expliquer, s'observe pour les catégories « scories » et « terre cuite indét. ».



dont 58 uniquement dans la couche d'abandon (pos. 4a) ? Enfin, la valeur des mètres carrés 5 et 9, respectivement très haute et très basse, divergent de l'ensemble sans que l'on puisse apporter une explication rationnelle. Visiblement, il ressort que l'écume a logiquement été éliminée sur le crassier occidental, mais aussi à l'intérieur de la halle, particulièrement le long des parois, peut-être pour pallier aux courant d'air qui s'engouffraient au niveau du sol en raison de planches de façade disjointes ou abîmées ! La dispersion de ces éléments scoriacés sur l'ensemble de la fouille, aussi bien sur les niveaux de circulation qu'au sein des crassiers, révèle une pratique d'élimination peu scrupuleuse et sans véritable systématique.

### Analyses chimiques

Initialement interprétés comme possible « fritte », ces éléments scoriacés variés ont été reclassés dans la catégorie « écume » au cours de l'étude. Deux raisons principales expliquent ce choix : d'une part, la fouille n'a pas pu mettre en évidence de four spécifiquement dévolu à la production de fritte<sup>139</sup>, pour autant qu'il n'y en ait jamais eu un, et d'autre part, aucune explication objective ne permet d'interpréter le rebut de tant de matière première dans et autour de la halle. Toute classification au sein de cette catégorie de déchets, plus ou moins vacuolés, plus ou moins denses, paraît

difficile à réaliser d'un point de vue macroscopique. Le critère de la teinte, variant du gris clair au gris foncé, n'est guère fiable et demeure très subjectif. La question de la fritte sera traitée ci-dessous.

D'un point de vue chimique, il doit être possible de distinguer entre un produit surnageant sur du verre en fusion, l'écume, et une composition chauffée sur une sole, la fritte. Les analyses chimiques réalisées sur une trentaine de fragments d'écume<sup>140</sup> révèlent une composition assez homogène, riche en silice et oxyde de calcium, proche de celle du verre (Gerber/Stern chap. 4.2.3.5) Des lames minces auraient sans doute permis de mieux caractériser ces éléments plus ou moins scoriacés, peut-être même de les distinguer entre eux, mais nous n'avons pas orienté l'étude dans ce sens, ce qui – nous l'admettons – représente une lacune regrettable. La caractérisation archéologique et l'étude minéralogique des frites, ainsi que des sous-produits de la fusion du verre, restent à faire et mériteraient sans doute plus d'égards de la part de la communauté scientifique.

### 3.3.2.4 Commentaire

L'ensemble des déchets de production, meules et verre brut compris, constitue une part importante du verre fragmenté recueilli sur un site verrier. Dans le cas du Pâturage de l'En-

139 Gerber 2010, 66-67.  
Voir aussi chap. 3.3.4. et 4.2.3.5.

140 Stern/Gerber 2002, 1-7 et figures.

vers, cela représente plus d'un tiers des fragments (fig. 10). Certains présentent plus d'intérêt que d'autres, à l'image des meules qui trahissent non seulement les diverses teintes des paraisons soufflées, mais renseignent aussi sur les modèles et les diamètres de cannes utilisées. Ainsi découvre-t-on que la fabrication de verre commun (couleur verte) domine largement l'éventail des teintes produites avec 86 % des fragments collectés, tous types confondus. Au sein des 14 % restants, la catégorie du verre filigrané retient l'attention. Quoique sa fabrication fût sans doute assez confidentielle sur le site du Pâturage de l'Envers, elle constitue le premier témoignage tangible, attesté par l'archéologie, d'une production de verre filigrané en Suisse. Erwin Baumgartner<sup>141</sup> l'avait déjà soupçonnée en raison de la présence récurrente, dans nombre de musées suisses, de verres à jambe en balustre réalisé dans cette technique.

La répartition des fragments de verre filigrané, tous types de tessons confondus, révèle que la zone de l'estrade nord (zone 4.4) a livré 74 fragments contre 53 à son pendant sud (zone 4.3). Cette concentration au niveau de l'estrade nord pourrait trahir la présence d'un verrier qui y réalisa ces pièces de plus grande complexité.

Parmi les déchets de production de verre, deux groupes restent peu évidents à identifier et à départager : la fritte et l'écume. D'un aspect souvent grisâtre, ces débris offrent une structure vacuolaire plus ou moins prononcée et révèlent la présence de grains de silice non fondus. La quantité d'écume produite à la fonte est étroitement liée au fondant utilisé dans la composition vitrifiable. Ainsi, l'introduction de cendres brutes, non lessivées, produit-elle plus d'écume qu'une cendre épurée et concentrée par lixiviation (voir chap. 2.1.2). Les importants volumes d'écume observés sur le site du Pâturage de l'Envers s'expliqueraient ainsi par la production massive de verre commun, de couleur verte, tant dans la gobeletterie et le flaconnage que dans le vitrage. L'absence d'un frittage généralisé des compositions (voir chap. 3.3.4) contribue encore à soutenir la formation d'écume à la surface du verre.

### 3.3.3 Débris de verre indéterminés

Les débris de verre indéterminés se rapportent aux fragments dont ni la forme générale, ni la courbure, ne permettent une identification claire. Leur aspect général offre une ligne régulière au galbe plus ou moins prononcé. Il peut s'agir aussi bien de tessons de paraisons soufflées que de parois. Ces tessons ne sont pas ornés et ne portent aucune trace d'outil. Cette catégorie n'offre en définitive qu'un intérêt limité, aussi ne lui accorderons-nous que peu d'attention.

#### *Données quantitatives et répartition spatiale*

Avec 19 357 unités, les débris indéterminés représentent près d'un tiers du matériel vitreux collecté sur le site. L'essentiel provient du secteur A (92,9 %), sans que cela soit une surprise au vu des critères de sélection opérés dès la seconde campagne de fouille (fig. 10). Néanmoins, la distribution au sein du secteur A révèle une forte concentration dans les zones 2, 4.3 et 5 qui concentrent près de 60 % des débris indéterminés. La présence de surfaces d'épandage et de crassiers privilégiés explique probablement ce phénomène. En comparaison, l'espace situé à l'est de la halle (zones 7 à 13) livre moins de matériel : un peu plus de 7 % du volume de cette catégorie. Une des raisons tient à la mise en place d'une clef de tri, donc de collectes moins exhaustives.

Au niveau des couleurs représentées, la distribution générale est très proche de celle observée pour les meules ou les déchets de production : la couleur verte domine avec 88,4 %, alors que l'incolore se tient à près de 10 %. Le périmètre de l'estrade sud fournit plus du double de tessons incolores que son pendant nord. Mais inversement, les zones d'épandage nord (1 et 2) sont plus riches en débris incolores que les espaces est ou ouest. Cette apparente contradiction s'explique peut-être simplement par la récupération et le recyclage des tessons.

Quoique la production de verre filigrané n'ait été qu'un phénomène marginal sur notre site, il nous paraît important de relever la concentration de débris spécifiques à proximité de l'estrade nord<sup>142</sup> (zone 4.4) et de la zone 2 qui la jouxte, qui à elles deux livrent

<sup>141</sup> Baumgartner 1995, 51.

<sup>142</sup> En particulier le niveau de sol A4g qui livre 10 des 17 fragments de cette zone.

près de la moitié du corpus. Un autre lot de onze pièces provient d'une zone d'épandage à l'est (zone 10).

### 3.3.3.1 Commentaire

Quoiqu'ils représentent une large part des tessons collectés, les débris indéterminés n'apportent guère d'enseignement particulier. Ils rappellent au besoin que le verre brisé n'est pas collecté de façon systématique par les verriers, à tout le moins sur le site du Pâturage de l'Envers, qui regorge de débris de toutes sortes. On peut néanmoins s'étonner que dans la zone 11, qui selon nos observations de fouille, devait accueillir au niveau de l'angle sud-est de la halle, les stocks de matières premières, notamment de groisil<sup>143</sup>, il n'y ait pas plus de débris de verre de cette catégorie. En effet, le pilage du verre récupéré conduit à son fractionnement, compliquant sérieusement toute identification de forme.

### 3.3.4 Fritte ?

En verrerie, on désigne par le terme fritte, le produit obtenu par calcination de la composition verrière. Elle se prépare en général dans un four séparé, sur une sole chauffée. Les granulats obtenus sont ensuite pilés ou broyés avant d'être mis à fondre dans les creusets. La fritte est souvent le matériau qui pose le plus de problèmes d'identification sur la fouille d'ateliers verriers : Lang n'aborde guère le sujet, tandis que Kinga Tarcsay regroupe les déchets scoriifiés sous le qualificatif de « verschlacktes Material »<sup>144</sup>. Frommer et Kottman décrivent une fritte d'aspect granuleux et concrétionné, qui prend parfois l'apparence de galettes grises mates en surface, dont le cœur est souvent vitrifié<sup>145</sup>. Il est évident que l'apparence de la composition varie, évolue, en fonction du degré d'échauffement subi et de la transformation ou vitrification progressive de ses composants. L'analyse au microscope de lames minces pourrait éventuellement faciliter l'identification de la fritte « archéologique » en mettant en évidence les différents composants primaires, mais les éléments carbonatés du fondant pourraient ne pas apparaître, en raison du lessivage subi au cours de leur séjour prolongé en surface de crassier, puis dans le sol.

Ainsi que nous l'avions déjà mentionné dans le volume 1 (voir chap. 2.2.5), l'identification de fritte sur le site du Pâturage de l'Envers n'est pas aisée ; soit qu'elle ait été récupérée de manière exhaustive, ce qui paraît peu probable, soit qu'elle n'ait été produite que de manière ponctuelle, à l'occasion par exemple d'une production spécifique de qualité supérieure. La seule catégorie de débris grisâtres, un tant soit peu apparentée aux matériaux décrits par les auteurs précités, est celle décrite au chapitre 3.3.2.3 : il s'agit de l'écume.

Lors du tri des verres en vue de la saisie informatique, nous avons considéré une catégorie *fritte*, mais avec réserve. Sous ce terme sont réunis des fragments de verre, dont la matrice est encore riche en grains de sable visibles à l'œil nu. Il ne s'agit pas de fritte à proprement parler, mais d'éléments vitreux, fracturés et anguleux, qui témoignent plutôt d'un processus direct de fusion de la composition dans le creuset. Comme cette catégorie de matériel n'a pas fait l'objet d'un ramassage systématique, son traitement statistique n'offre aucun intérêt. L'ensemble collecté sur le site compte 532 pièces représentant un poids total de 5551 g.

## 3.4 Verres produits

Contrairement à bien des verreries françaises ou allemandes, il n'existe, pour les établissements du Chaluët, aucun document comptable relatif à la production, que ce soit au niveau des formes ou des volumes. Les seuls chiffres disponibles touchent aux livraisons de sable et de matériaux réfractaires, apparemment conditionnés en tonneaux et voiturés jusqu'au site. Malheureusement, là encore une inconnue subsiste, et de taille : la contenance desdits tonneaux (voir chap. 2.1.1.2). C'est donc le corpus d'objets qui devient la source d'information privilégiée pour définir les types de production du site.

### 3.4.1 Vitrage

Dès le Moyen Âge, trois techniques de fabrication distinctes du vitrage ou verre plat coexistent en Europe : le verre dit en plateau, le verre en manchon et la cive. Les aires de diffu-

<sup>143</sup> Gerber 2010, 69-70.

<sup>144</sup> Lang 2001 ; Tarcsay 2009, 100-103.

<sup>145</sup> Frommer/Kottmann 2004, 170-173.

sion de ces principes de fabrication reflètent un fort ancrage régional, mais elles s'imbriquent parfois au gré de migrations verrières ou dans les zones de contact entre deux régions aux savoir-faire distincts.

Le *verre en plateau* consiste en la réalisation de grands disques qui sont ensuite découpés en carreaux ou losanges selon les besoins des vitriers. Cette méthode appelée aussi *verre de France* ou *verre à boudine* s'est développée dans le nord de la France, surtout dans le nord-ouest. Protégée en France par des privilèges et des ordonnances royales, ce procédé, qui assurait le revenu de nombreuses familles verrières, allait empêcher la diffusion de la technique du verre en manchon, pourtant plus performante en termes de coût et rendement ! Elle fut introduite progressivement dès les 15<sup>e</sup>-16<sup>e</sup> siècles aux Pays-Bas, en Belgique et en Angleterre<sup>146</sup>. Alors qu'en Allemagne, une production de « grossen Frantz-runden Scheiben zu Fensterglas » est attestée dès la toute fin du 17<sup>e</sup> siècle<sup>147</sup>, la Suisse ne semble pas touchée par le phénomène, mais l'état des connaissances demeure encore trop lacunaire pour être définitif.

Le *verre en manchon*, dit aussi *en table* ou encore *en canon*, est obtenu à partir d'un cylindre soufflé, refendu à chaud puis étendu dans une arche spécifique. Décrite par le moine Théophile au début du 12<sup>e</sup> siècle, la technique du soufflage en manchon fut pratiquée, semble-t-il, surtout au nord des Alpes (Allemagne méridionale, Bohême, Lorraine). En revanche, elle n'aurait été introduite que plus tard au nord de l'Allemagne, en France et finalement en Angleterre à la fin du 17<sup>e</sup> siècle<sup>148</sup>. Venise, pourtant garante d'excellence en matière de production verrière européenne, ne maîtrisait pas cette technique, qu'elle chercha à plusieurs reprises à introduire dans son répertoire<sup>149</sup>. Qualifiée souvent de « façon de Lorraine »<sup>150</sup>, cette technique de fabrication du verre plat fut, semble-t-il, parfaitement maîtrisée par les verriers de l'est de la France actuelle.

La *cive*, encore appelée *cibe* ou *cible*<sup>151</sup>, consiste en un disque de verre fin, caractérisé par un bord rabattu et un petit ombilic central (marque du pontil). Obtenue par soufflage et rotation, la cive constitue un produit de masse facile à réaliser. Les plus anciens témoignages de vitrage circulaire obtenu par ro-

tation remontent à la fin de l'Antiquité et proviennent du Moyen-Orient. Si l'introduction de la cive en Europe semble intervenir autour de l'an mille, sa véritable diffusion ne démarra qu'au 12<sup>e</sup> siècle. Au Moyen Âge, les cives vénitiennes<sup>152</sup> étaient particulièrement appréciées pour leur transparence et importées à grands frais par les seigneurs et nobles fortunés. Les diamètres de cives varient à travers le temps et des modules différents peuvent coexister<sup>153</sup>, sans que cela pose de difficultés particulières aux vitriers ou vitriers de cabinet habillant les châssis de bois. Soucieuses de participer à ce marché florissant, les verreries du Nord des Alpes s'attelèrent, au plus tard dès le 15<sup>e</sup> siècle, à imiter les produits vénitiens et parvinrent à produire des pièces de bonne qualité à même de rivaliser avec celles de la Sérénissime<sup>154</sup>. Traditionnellement attribuée aux régions germaniques (Allemagne, Autriche, Suisse), la production de cives se rencontre encore, outre en Italie du Nord, dans le Val de Loire et ce dès le 15<sup>e</sup> siècle<sup>155</sup>, ce qui suggère une aire de fabrication et de diffusion sans doute beaucoup plus étendue que celle généralement acceptée.

Sur le site du Pâturage de l'Envers, la production de verre en manchon est attestée conjointement à celle de cives. Un troisième groupe de verre plat, plus rarement observé et peu décrit dans la littérature spécialisée, a encore été mis en évidence : le verre en calotte, que les chercheurs allemands nomment parfois « Tellerscheiben ». Dans le cadre de l'étude du verre plat mis au jour sur le site, nous avons retenu cinq groupes : les carreaux (issus de manchons), les cives, les verres en calottes, les verres géométriques grugés ou découpés et les vitraux. Seuls les quatre premiers groupes ont été produits sur place, le cinquième rassemble des verres étrangers au site, peut-être collectés ou ayant fait partie d'un objet personnel (vitrail de cabinet par exemple). En tout, 10 017 fragments de vitrage, d'un poids total de 15 166 g, ont été identifiés. Les cives constituent la catégorie la mieux représentée avec 7334 pièces (73 %), devant les manchons (1351) et les calottes (1120). Les découpes de verre et les fragments de vitraux forment des complexes marginaux de respectivement 185 et 22 tessons.

146 Philippe 2009, 84.

147 Loibl 2003, 105.

148 Theophilus c.1125/1999, vol. I, 147-150 (De diversibus artibus chap. VI et IX); Bontemps 1868, 232-233; Crossley 2009, 194-197.

149 Zecchin 1990, 369-370. Selon Luigi Zecchin, l'introduction du verre en manchon se situerait vers 1507 et reviendrait à un certain Redor, verrier-miroitier.

150 Philippe 2009, 82-84.

151 La voix populaire l'appelle parfois encore « verre en cul de bouteille ». Gerber 2009, 187-192 ; brève description dans Bellanger 1988, 309. Cive, cible ou cible constituent des variantes phonétiques du mot allemand Scheiben qui signifie disque, mais aussi, par extension, la fenêtre.

152 Luigi Zecchin signale la fabrication de cives, nommées plus tard « rui », dès le 14<sup>e</sup> siècle : Zecchin 1987, 36 et Zecchin 1990, 158, 320-323. Voir aussi Steppuhn 2002, 374-375 (importations vénitiennes attestées au début du 14<sup>e</sup> siècle, en Europe du Nord).

153 A l'image de l'épave de Gnalić (1583), dont le chargement comprenait trois modules de cives, soit 17, 18,5 et 20,5 cm ; Lazar/Willmott 2006, 72 et 137.

154 Steppuhn 2002, 374.

155 Philippe 2009, 81.



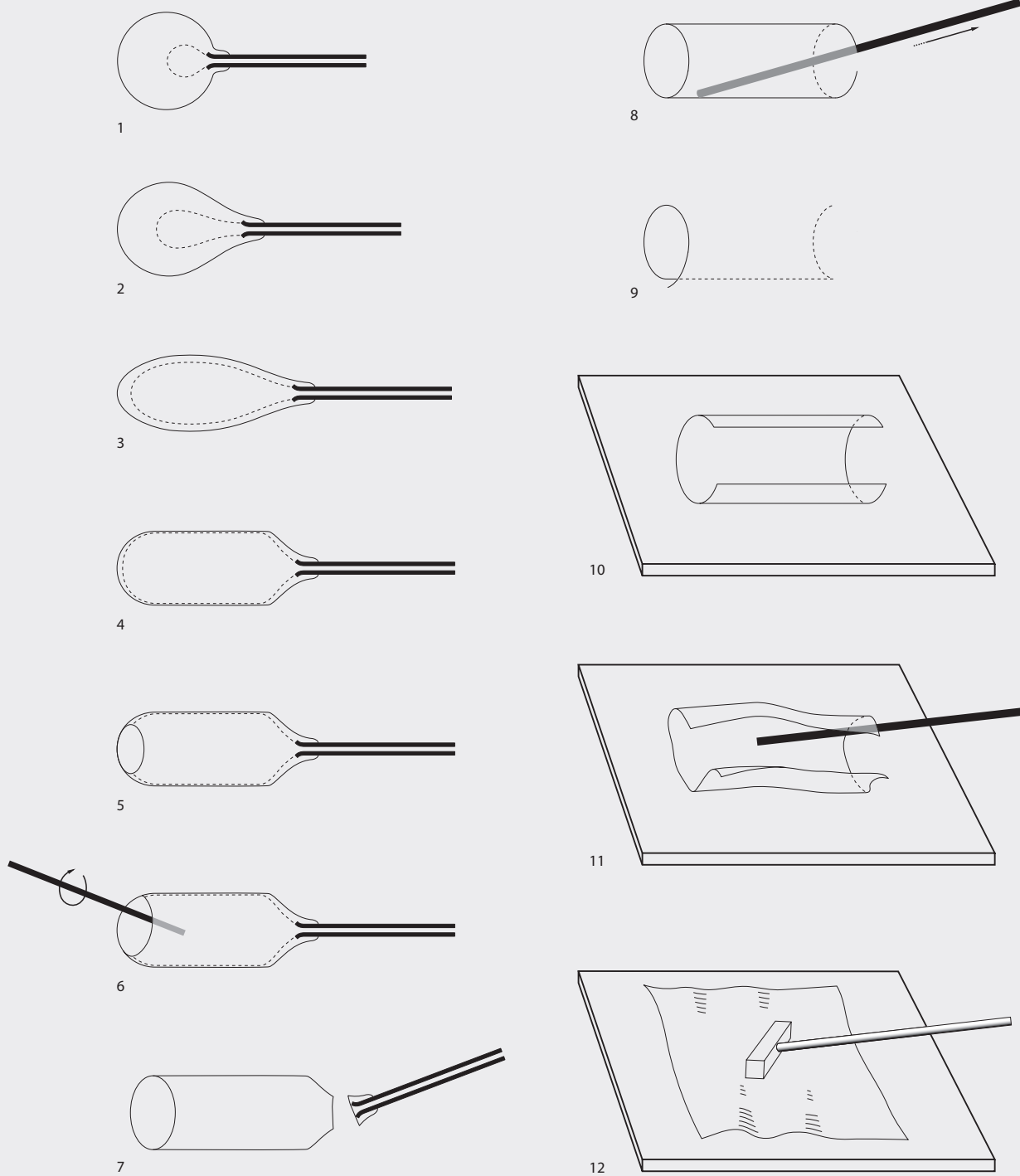


Fig. 28 : Etapes de fabrication du verre au manchon. Inspiré de Lang 2001, 49.

### 3.4.1.1 Manchons

Le verre plat en manchon est obtenu à partir d'un cylindre soufflé à la volée. L'allongement de ce dernier se produit naturellement grâce au mouvement de balancier qu'imprime le souffleur, alors que le verre soufflé encore chaud est toujours fixé au mors de la canne (fig. 28). L'usage d'un demi-moule incliné fixe, creusé dans une bille de bois de fruitier ou de hêtre (fig. 29), devait servir à modeler la paraison et à lui conférer un diamètre régulier, à même de garantir la production de pièces homogènes et de dimensions régulières. Quand il est achevé, le manchon est ouvert à son extrémité, puis déposé sur un support en bois où il sera décalotté ; il est ensuite fendu sur toute sa longueur par l'application rapide d'un ferret chauffé au rouge. Ensuite, le manchon fendu est porté dans une arche spécifique, où sous l'action de la chaleur il se ramollit, puis s'ouvre pour fina-

lement être étendu au moyen d'un rabot d'acier ou de bois tendre. La plaque obtenue est alors dressée dans une chambre connexe, dans laquelle elle subira une lente recuisson jusqu'à atteindre la température ambiante. Dans les manufactures récentes, four de fusion et arches à recuire sont placées sous le même toit, alors que dans les verreries forestières antérieures, il n'était pas rare que les étenderies se trouvassent dans une cabane distincte appelée *Strekhaus* ou *Streckhütte*. Tel fut le cas au Pâturage de l'Envers<sup>156</sup>. Bontemps indique que « les manchons de 1 et demi à 2 millimètres d'épaisseur, quelle que soit leur dimension, n'ont pas besoin d'être recuits », mais il précise que « quand on fait des manchons un peu grands et de 3 à 4 millimètres d'épaisseur, [...] il y a nécessité de faire subir une recuisson avant de fendre les manchons pour les étendre »<sup>157</sup>. Dans son traité de 1818, Tabor livre un détail précieux qui nous permet de préciser une étape du



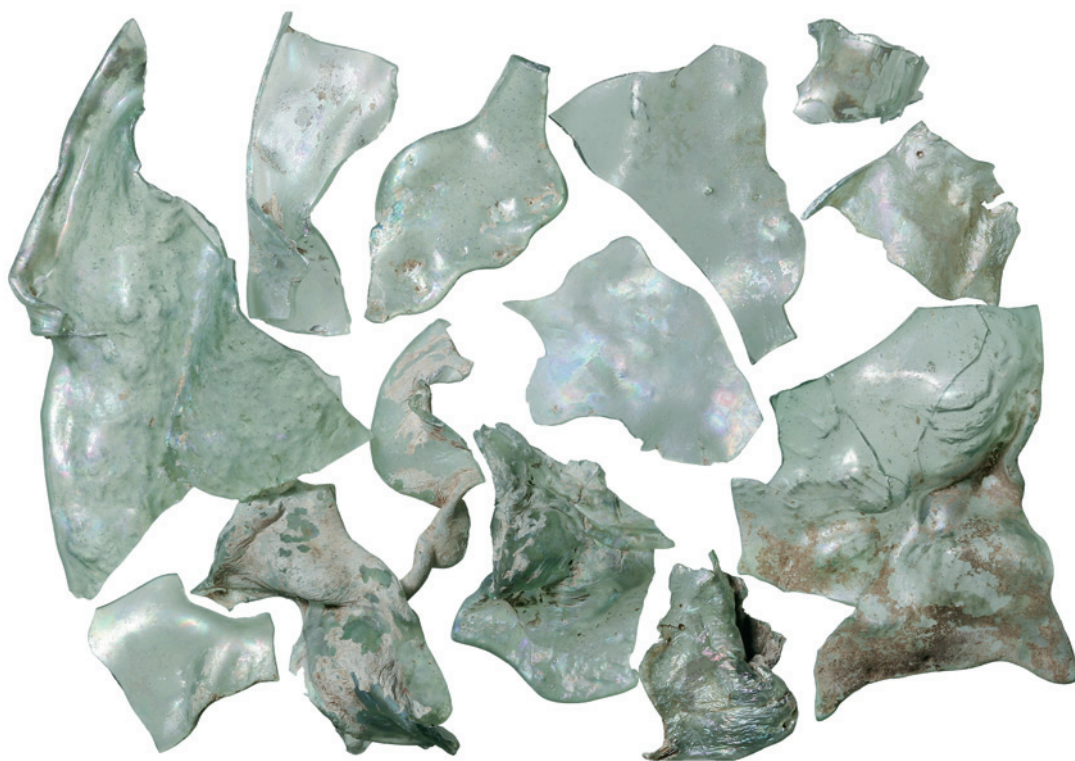
Fig. 29 : Représentation du soufflage du verre au manchon dans une manufacture du 19<sup>e</sup> siècle. A noter l'usage de demi-moules inclinés servant au formage du manchon. Tiré de Henrivaux 1883, fig. 120.

<sup>156</sup> Voir à ce sujet Gerber 2010, 77-86 et Gerber 2009, 189-190.

<sup>157</sup> Bontemps 1868, 270.



Fig. 30 : Court, Pâturage de l'Envers. Feuilles de verre : ratés de fabrication (sélection). Ech. 1:2.



processus de fabrication : il signale que les pots à recuire (voir chap. 5.9) servent à la recuisson des manchons et que leur taille est adaptée en fonction de leur diamètre. Il en donne même les dimensions : 24 à 36 pouces (60 à 90 cm) de haut pour 16 à 18 pouces (40 à 45 cm) de diamètre<sup>158</sup>. Les pots à recuire retrouvés au Pâturage de l'Envers sont plus petits et mesurent 24 à 36 cm de diamètre pour 50 à 60 cm de hauteur.

#### 3.4.1.2 Déchets de production

A la différence de Frommer et Kottmann<sup>159</sup>, nous n'avons pas découvert ces espèces de demi-boules distales pincées, les « Zangen-

halbrunde », qu'ils attribuent à la production de verre en cylindre. Par contre, les fouilles ont révélé des ratés de production survenus lors de la délicate opération d'étendage. Ces débris se présentent sous la forme de fragments de feuilles ondulées d'épaisseurs variables, assez riches en bulles d'air, dont l'apparence rappelle les *merveilles* ou *beignets-sur-le-genou* (fig. 30-31). Leur teinte tire généralement sur le vert pâle. Avec 726 tessons, les ratés de fabrication représentent 53 % du corpus de verre au manchon récolté, feuilles et carreaux inclus (fig. 32-33). Près de 98 % de ces ratés se concentrent sur la surface 7 du secteur C, ce qui n'a laissé aucun doute à l'auteur quant à l'interprétation des deux fours localisés à cet

Fig. 31 : Court, Pâturage de l'Envers. Le plus grand fragment de feuille de verre ratée retrouvé en fouille. Ech. 1:1.



158 Tabor 1818, 83, § 48 : «Die Kùhlhafen [ ] dienen zum Abkùhlen der Glaszylinder, richten sich also auch nach ihrer Grösse ».

159 Frommer/Kottmann 2004, 189-190.

secteur	zone	feuilles/carreaux				feuilles ratées			cives			calottes			découpes				tessons
		vert	incolore	autre	total	vert	incolore	total	vert	incolore	total	vert	incolore	total	vert	incolore	autre	total	
A	1	9	0	0	9	0	0	0	316	3	319	1	127	128	3	0	0	3	1
	2	5	0	0	5	0	0	0	769	2	771	0	78	78	10	6	5	21	0
	3	3	0	0	3	0	0	0	238	0	238	0	23	23	5	0	2	7	4
	4.1	1	0	0	1	0	0	0	6	0	6	0	0	0	1	0	0	1	0
	4.2	2	4	0	6	0	0	0	82	9	91	0	5	5	0	0	0	0	0
	4.3	31	24	7	62	0	0	0	1567	7	1574	2	273	275	42	23	3	68	10
	4.4	3	1	1	5	0	0	0	217	12	229	0	83	83	4	3	0	7	2
	4.5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	4	4	0	0	0	0	0
	5	27	3	1	31	0	0	0	2722	2	2724	18	127	145	19	19	1	39	3
	6	0	0	1	1	1	0	1	55	2	57	0	27	27	0	1	1	2	1
	7	0	0	0	0	0	0	0	11	0	11	1	4	5	0	0	0	0	0
	8	3	7	5	15	0	0	0	198	5	203	6	61	67	12	0	1	13	1
	9	2	0	0	2	0	0	0	48	0	48	0	15	15	0	1	0	1	0
	10	2	6	1	9	0	0	0	94	1	95	2	11	13	0	0	0	0	0
	11	3	1	1	5	0	0	0	303	0	303	8	97	105	4	4	0	8	2
	12	0	2	1	3	1	0	1	63	0	63	0	5	5	0	0	0	0	0
	13	2	0	0	2	0	0	0	40	0	40	3	10	13	1	0	0	1	0
	sous-total	93	48	18	159	2	0	2	6730	44	6774	41	96	137	101	57	13	171	24
C	habitation 2	17	12	0	29	1	0	1	134	8	142	3	24	27	3	1	1	5	2
	habitation 3	45	11	0	56	16	0	16	197	18	215	3	19	22	1	2	1	4	0
	surface 5	3	0	0	3	0	0	0	1	0	1	0	4	4	0	0	0	0	0
	surface 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	surface 7	46	18	4	68	631	61	692	91	7	98	0	51	51	0	0	0	0	1
	surface 8	1	1	0	2	0	0	0	11	0	11	1	2	3	0	0	0	0	0
	sous-total	112	42	4	158	648	61	709	434	33	467	7	100	107	4	3	2	9	3
D	habitation 1	141	6	0	147	0	0	0	42	0	42	1	14	15	1	1	0	2	0
E		0	1	0	1	1	0	1	5	0	5	0	1	1	1	0	0	1	0
F		15	0	0	15	9	0	9	4	0	4	0	2	2	0	0	0	0	0
G	non stratifié	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0
	surface 1	0	0	0	0	0	0	0	6	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
	surface 2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	surface 3	0	0	0	0	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	surface 4	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	1	1	0	0	0	0	0
	sous-total	0	0	0	0	4	0	4	12	0	12	0	2	2	0	0	0	0	0
H	surface 9	0	0	0	0	1	0	1	3	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0
I	habitation 4	27	2	122	151	0	0	0	5	0	5	1	0	1	0	0	0	0	0
K		0	0	0	0	0	0	0	22	0	22	0	0	0	2	0	0	2	0
total général		388	99	144	631	665	61	726	7257	77	7334	50	1070	1120	109	61	15	185	27

Fig. 32 : Court, Pâturage de l'Envers. Tableau de répartition des différents types de verre plat par secteur et zone.

endroit<sup>160</sup>, une fabrication ailleurs sur le site n'étant guère envisageable, faute d'installation adéquate. Parmi les feuilles ratées, la couleur verte domine avec 91,6 % du corpus ; le solde est de teinte plus claire et défini comme incolore.

Aucune feuille entière n'a été mise au jour. Mais nous pouvons raisonnablement penser qu'elles ne devaient pas être très grandes, car à la fin du 17<sup>e</sup> et encore au début du 18<sup>e</sup> siècle, les fenêtres dites « à petits carreaux » restent la

règle. L'épaisseur souvent irrégulière des fragments de feuilles ratées retrouvées atteint entre 2 et 4 mm, alors que celle des tessons de carreaux finis collectés sur le site mesure entre 1 et 2 mm. Cette différence s'explique par le travail d'étendage qui permet d'amincir la feuille de verre ramollie et d'en régulariser la surface au moyen d'un rabot de bois (fig. 28). Les opérations de soufflage et d'étendage « marquent » le verre de signes caractéristiques, comme de fines stries linéaires, des structures

<sup>160</sup> Pour la description de l'étenderie, voir Gerber 2010, 77-86.



Fig. 33 : Court, Pâturage de l'Envers. Distribution des verres au manchon ratés (feuilles) par secteur et zone.

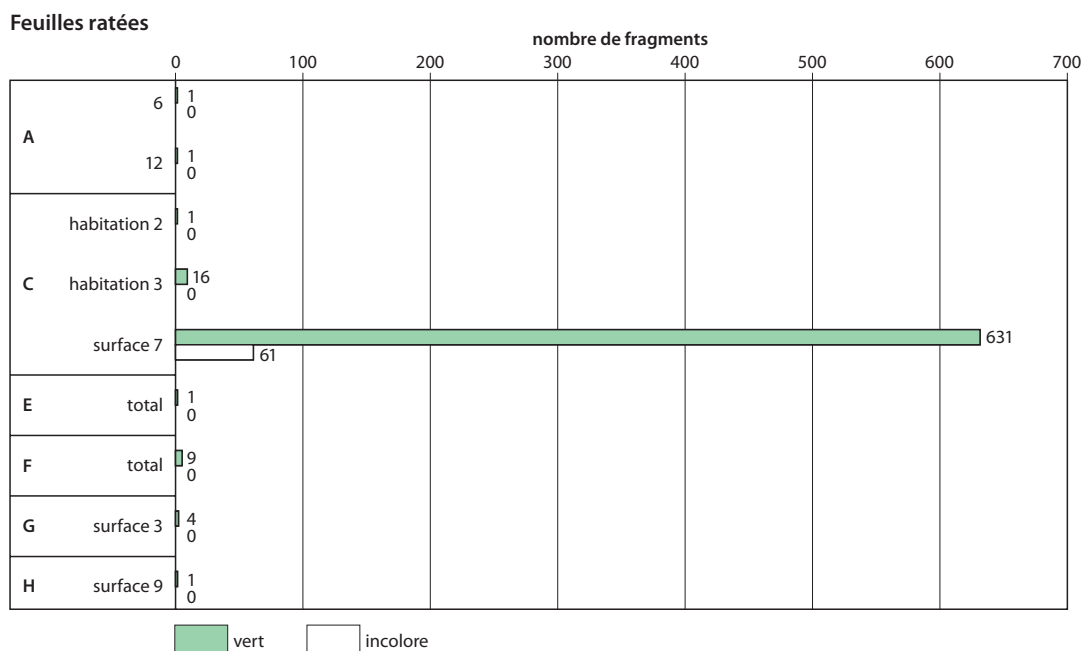


Fig. 34 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragments de carreaux en verre commun. Ech. 1:2.

filandreuses (bien visibles dans un verre mal épuré) et des microbulles d'air de forme étirée, prisonnières de la masse vitreuse.

### 3.4.1.3 Feuilles et carreaux

Après l'étendage et la recuisson, le verrier obtient une feuille d'épaisseur régulière, mais dont les dimensions peuvent varier quelque peu en raison de la variabilité de taille et de diamètre des manchons initiaux. L'étendage proprement dit (poids du rabot, chaleur du four) peut influencer sur l'épaisseur de la feuille, donc finalement aussi sur son aire et sa forme

finale. Le bord de la feuille se laisse en général bien identifier par sa forme arrondie, parfois légèrement surépaissie.

En tout 631 fragments de feuilles et carreaux ont été identifiés (fig. 32-33), soit une centaine de moins que les manchons ratés (726). Par contre, il n'est pas aisé, au sein de ces débris, de distinguer entre un fragment de feuille ou de carreau. Les carreaux qui furent montés sur châssis et exposés aux intempéries se laissent parfois identifier grâce aux salissures ou traces de corrosion qui parsèment leur face extérieure non protégée. Le bord du carreau, inséré dans le châssis, reste quant à lui intact et propre. Le vert constitue la couleur dominante (62 %) des carreaux retrouvés, la teinte incolore représente 12 % (fig. 34-35), alors que le solde se répartit en diverses teintes pas forcément produites sur le site, mais qui entrent dans la confection de vitrage composite intégrant par exemple des vitraux de cabinet. Les carreaux retrouvés dans le niveau d'abandon de l'habitation 4 se distinguent par une couleur gris-bleu classée sous *autres* qui n'apparaît nulle part ailleurs sur le site. Cette différence pourrait suggérer que le menuisier qui réalisa ces fenêtres s'était approvisionné ailleurs<sup>161</sup>.

De manière générale et en comparaison des cives, les carreaux retrouvés sur le site apparaissent peu nombreux. Leur distribution, si elle couvre l'ensemble des secteurs, n'en reste pas moins assez discrète dans la halle (sec-

<sup>161</sup> Comme la fouille de ce complexe s'est déroulée en 2004 et que le mandat d'étude de la composition des verres avait déjà été attribué, aucune donnée chimique n'est disponible pour cet ensemble.

teur A), excepté peut-être dans les zones 4.3 et 5 (fig. 36). Par contre, leur présence est plus marquée dans les secteurs C et D qui couvrent l'habitat et l'étenderie. A ce titre, l'habitation 2, pourtant de dimension fort modeste, se distingue avec plus de 140 fragments. Les pièces retrouvées dans les alentours immédiats des habitations, ainsi que dans le comblement des caves, pourraient être rattachées à des fenêtres autrefois en place sur ces bâtiments, mais sans certitude.

La distribution homogène des feuilles/carreaux finis surprend quelque peu quand on connaît les étapes nécessaires à leur confection (voir volume 1, chap. 2.5), notamment dans notre cas, le transfert des cylindres soufflés de la halle vers l'étenderie. Nous serions donc en droit d'attendre une surreprésentation des carreaux dans la halle à étendre et ses abords immédiats, plus particulièrement dans la surface 7 du secteur C. Comme ce postulat n'a pas été confirmé par la fouille, plusieurs hypothèses sont envisageables : soit l'opération

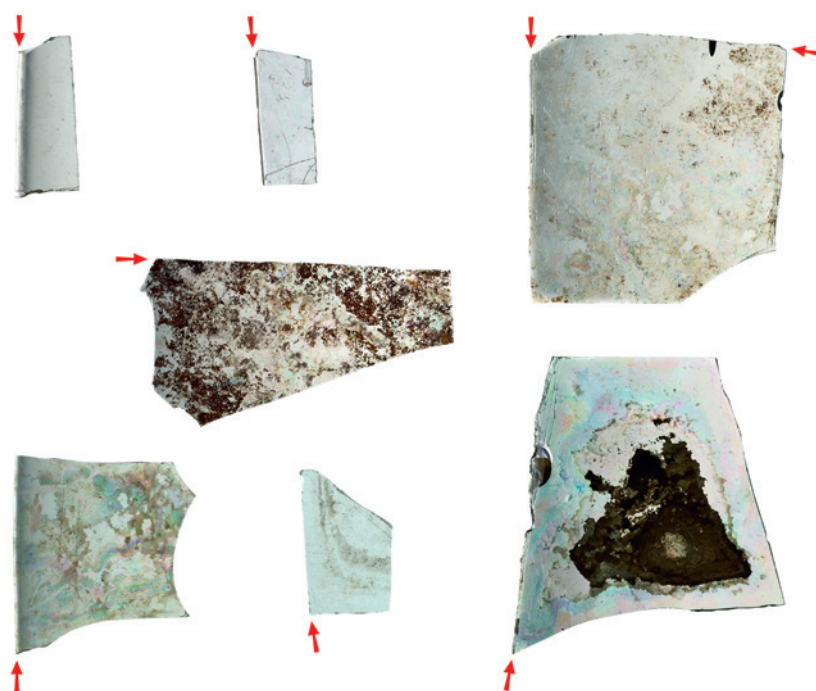


Fig. 35 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragments de verres au manchon (feuilles et carreaux) communs et incolores. Les flèches signalent les différents aspects des bords : arrondis, coupés ou grugés. Ech. 1:2.

#### Feuilles / carreaux

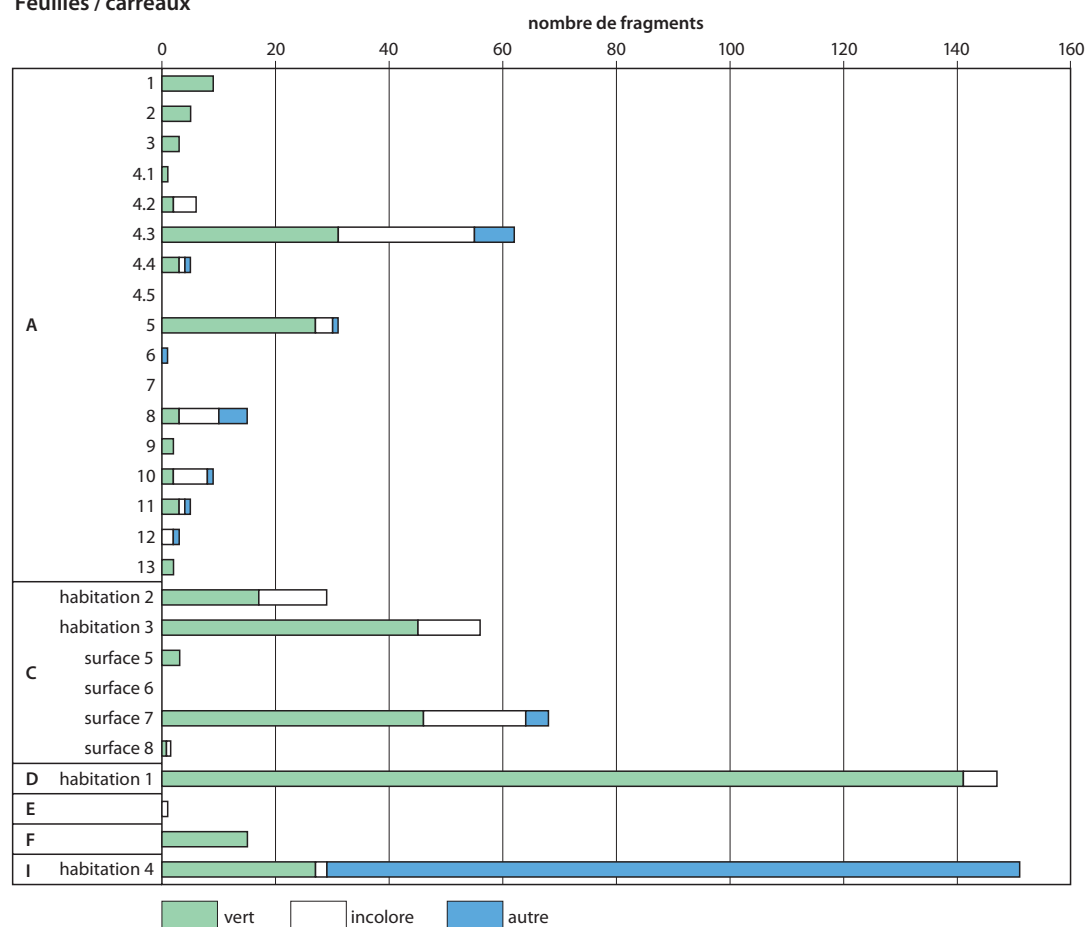


Fig. 36 : Court, Pâturage de l'Envers. Distribution des verres au manchon (feuilles et carreaux sans les ratés) par secteur et zone.

ne présentait guère de difficulté et n'a donc engendré que peu de débris, soit l'étenderie n'a fonctionné que ponctuellement, soit enfin le prélèvement de cette catégorie de matériel a été négligé par les fouilleurs, ce dont nous doutons. Au vu des maigres volumes de verre plat et à défaut d'autres indices, nous sommes tenté de privilégier l'hypothèse d'un fonctionnement restreint de l'installation, voire même d'un abandon rapide de cette production.

#### 3.4.1.4 Dimensions

Le diamètre et la longueur du manchon définissent les dimensions de la plaque, alors que son épaisseur est tributaire de la paraison initiale et du soufflage<sup>162</sup>. Les dimensions des feuilles produites au Pâturage de l'Envers ne peuvent pas être précisées sur la base des tessons recueillis. Tout au plus est-il possible, à partir du fragment de feuille le mieux conservé (fig. 31), quoique replié, d'en restituer les dimensions minimales : 190 et 220 mm de côté pour une épaisseur de 1,5 mm. Il est évident qu'à l'origine la feuille était bien plus grande. En admettant qu'une partie des manchons aient dû être recuits dans les récipients en terre évoqués ci-dessus, nous pouvons en déduire leurs dimensions maximales. Il est évident qu'afin d'éviter que les parois du pot ne rayent les cylindres de verre, ces derniers devaient avoir un diamètre légèrement inférieur à celui du contenant. Ainsi, un manchon de 30 cm de diamètre pour 40 cm de hauteur aurait produit une plaque de verre de 94 × 40 cm. Au vu des dimensions restreintes du four à étendre (1,20 × 1,60 m hors tout), la manipulation de plaques de verre aussi grandes ne paraît guère envisageable. Dès lors, on est en droit d'imaginer que les manchons produits au Pâturage de l'Envers étaient de taille réduite et atteignaient probablement une quarantaine de centimètres de haut pour une bonne quinzaine de centimètres de diamètre, ce qui porterait la feuille étendue à environ 50 × 40 cm.

Quelques documents historiques postérieurs d'un demi-siècle livrent des indications intéressantes quant aux différents formats de feuilles qui ont cours dans la région jurassienne. Ainsi, en 1764, la verrerie de Biaufond, au bord du Doubs, produit des feuilles d'épaisseur simple de 14 × 18 pouces, en

qualité ordinaire et blanche, mais aussi des feuilles d'épaisseur double, en qualité commune, de 12 × 16 pouces, soit 34,7 × 44,6 cm et 29,7 × 39,7 cm<sup>163</sup>. Vingt années plus tard, les magasins des verreries franc-comtoises stockent des feuilles plus souvent plus grandes : 25 × 18, 24 × 18, 22 × 16 et 20 × 16 pouces<sup>164</sup> ; Michel y mentionne jusqu'à dix formats distincts<sup>165</sup>. Si les feuilles de Biaufond devaient chacune se rapporter à l'étendage d'un cylindre, on obtiendrait des modules de petits diamètres : 7,1 cm pour une feuille d'épaisseur simple et 6,3 cm pour une feuille double. Techniquement, il nous paraît difficile de souffler des cylindres fins de si petits diamètres. Il est donc probable que les feuilles mentionnées furent le produit d'un découpage sur le site de production. En admettant le découpage en trois parties égales, nous obtiendrions des plaques de respectivement 104,1 × 44,6 et 89,1 × 39,7 cm, soit des valeurs proches des dimensions théoriques évoquées au début de ce sous-chapitre consacré au verre en manchon.

Sur la base de ces exemples, il ressort que les manchons soufflés au 18<sup>e</sup> siècle étaient de taille réduite, faciles à manipuler et adaptés aux fours à étendre de l'époque. L'évolution des fours et des places de travail couplée à l'amélioration du processus de fabrication, au cours du siècle suivant, permettra d'augmenter le rendement et d'obtenir, dans le cas de la production de verre plat, des manchons plus grands et plus longs.

Après étendage, le rognage selon des modèles-types permettait la création de feuilles calibrées à même d'être conditionnées par lots. Ultime maillon de la chaîne, le menuisier se chargeait de la découpe à façon pour adapter les carreaux au format des vitres confectionnées.

#### 3.4.1.5 Cives

La cive consiste en un disque de verre commun plat, à bord rabattu, de faible épaisseur. Elle est produite à partir d'une petite paraison maillonnée, soufflée en boule régulière, reprise au pontil, puis ouverte au moyen de forces jusqu'à obtenir par rotation rapide un disque dont la mise en forme finale et le rabat du bord sont exécutés au moyen d'une palette de bois humidifiée (fig. 37), éventuellement d'une planchette à charnière<sup>166</sup>. La cive achevée est en-

162 Ce processus de fabrication est abondamment décrit et repris dans la plupart des manuels verriers. Nous ne citerons que Fontenelle/Malpeyre 1898/1978, 375-381 et Bontemps 1868, 259-278.

163 AAEB Fiefs communs, St-Ursanne B239/1 ; Gerber 2009, 190 et note 15.

164 Pouce bisontin valant 2,61 cm. Feuilles de 65,4 × 47,1 cm, 62,7 × 47,1 cm, 57,5 × 47,1 cm et 52,3 × 47,1 cm.

165 Michel 1989, 256-257 et 268, notes 82-83.

166 Le verrier utilise de telles planchettes pour la confection des pieds de verre à boire. A La Rochère (FR), cet outil porte le nom de rouquette. Barbe 1993, 43.

suite détachée du pontil et déposée sur un tapis de cendres chaudes qui fait office de coussin. D'ailleurs, de nombreux fragments présentent sur la face opposée au pontil une croûte grise, grenue au toucher, qui témoigne de ce principe de recuisson. La composition de la croûte n'a pas été analysée, mais sa réaction vigoureuse à l'acide chlorhydrique témoigne d'une présence marquée de carbonate de calcium. La cive est reconnaissable au petit ombilic laissé par le ferret au centre du verre (fig. 38 et 39). Un seul verrier n'est pas à même de tout faire, deux personnes au minimum sont nécessaires par place chargée de produire des cives : un cueilleur-marbreur qui prépare la paraison et la souffle, et un chef de place qui la reprend au ferret et termine la pièce. En raison de la simplicité de réalisation, la cadence de production est élevée. Un gamin devait ponctuellement être occupé à récolter les cives terminées déposées sur un tapis de cendres après détachement du pontil.

Les moindres fragments de cive sont identifiables, même en l'absence du bord et de l'ombilic, grâce à la nature aplatie et extrê-

mement fine du verre, et aux cercles concentriques que la rapide rotation du pontil imprime à l'objet. Le principe de fabrication des cives rappelle celui des plateaux du « verre de France », si chers aux verriers normands, mais dans des dimensions nettement plus petites. Nous n'avons trouvé aucune trace de mention de recuisson de ces menus objets. La faible épaisseur du verre rendait cette opération superflue : un refroidissement sur un tapis de cendres tièdes devait suffire.

A partir du 16<sup>e</sup> siècle, sa confection aisée et rapide en fait un produit de masse, mais de qualité souvent médiocre : teint verdâtre, faible transparence, effet déformant de l'ombilic central et des stries concentriques. Ces défauts l'empêchent de rivaliser avec les cives vénitiennes réputées pour leur finesse, leur clarté et leur transparence. Soucieux des parts de marché qui leur échappent, les verriers du nord des Alpes adaptent leurs compositions et cherchent à produire des verres plus blancs, plus fins. On voit apparaître dès le 17<sup>e</sup> siècle de nouvelles dénominations verrières qui font référence à des

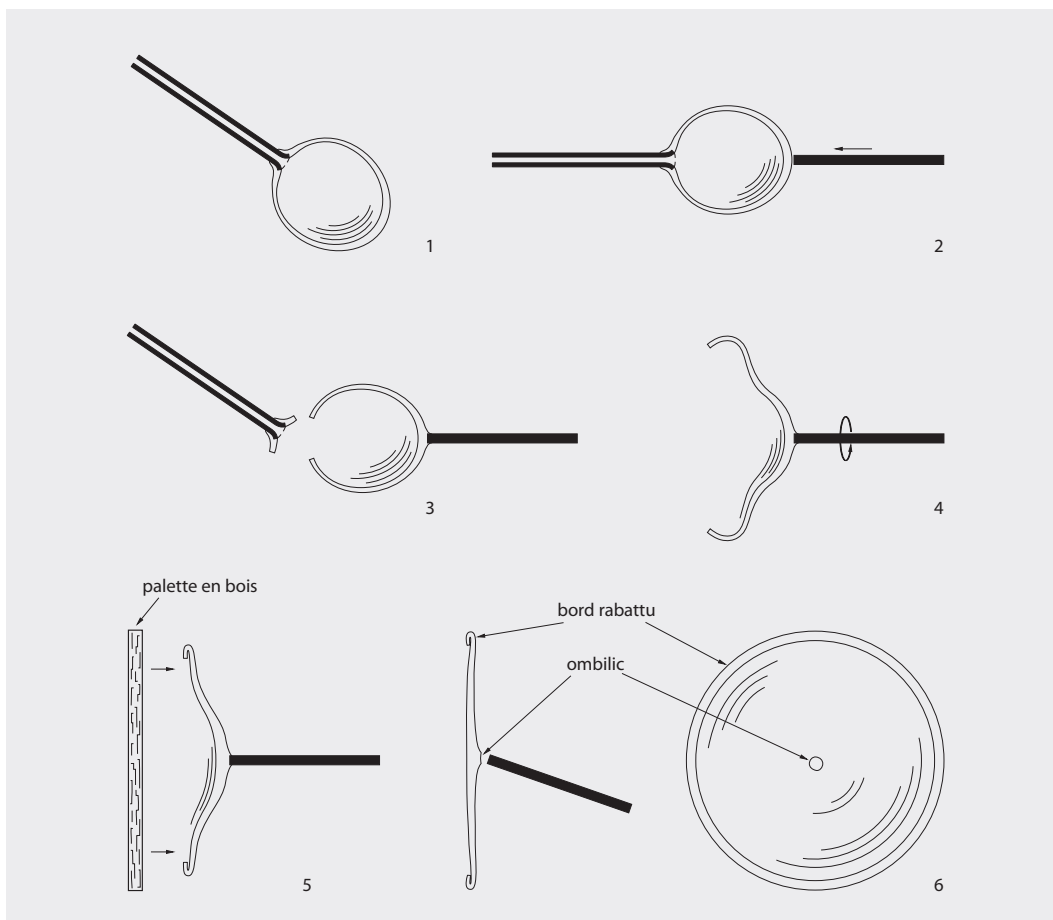


Fig. 37 : Etapes de fabrication d'une cive. D'après Lang 2001, 142.



Fig. 38 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragments de cives. Ech. 1:2.

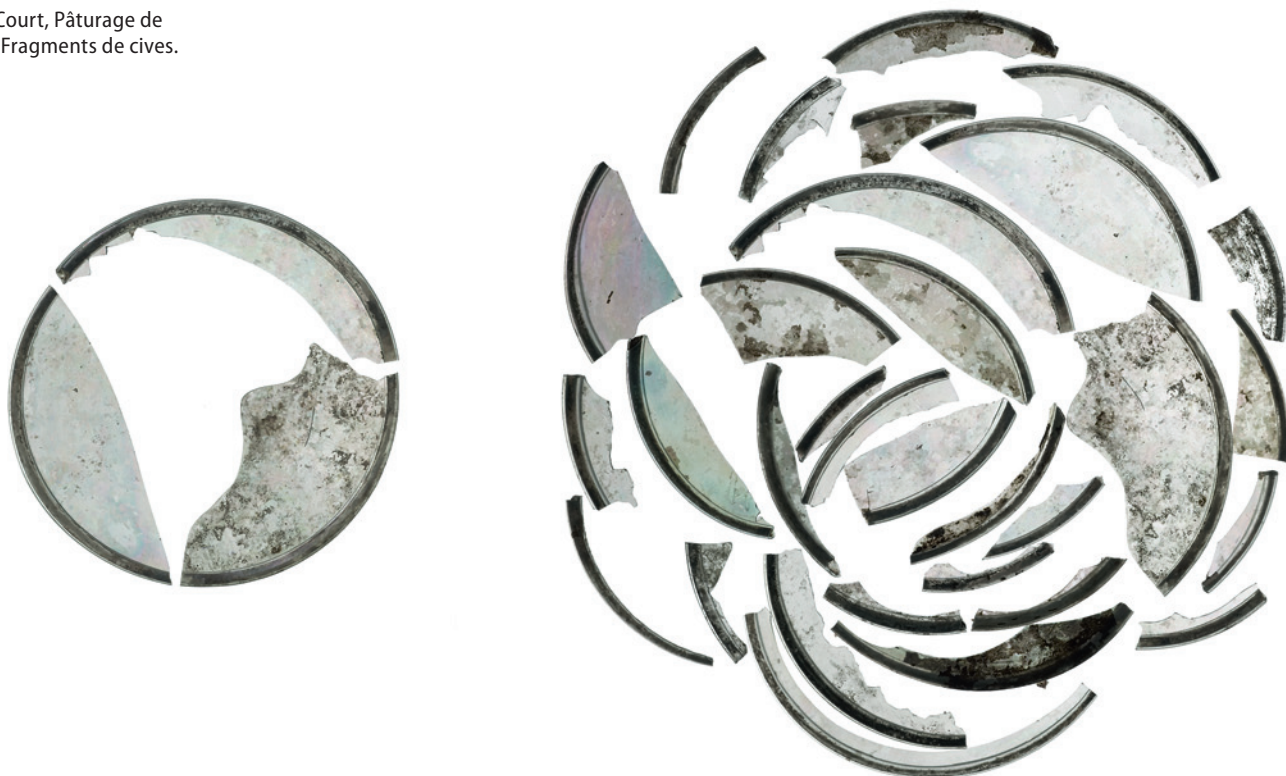
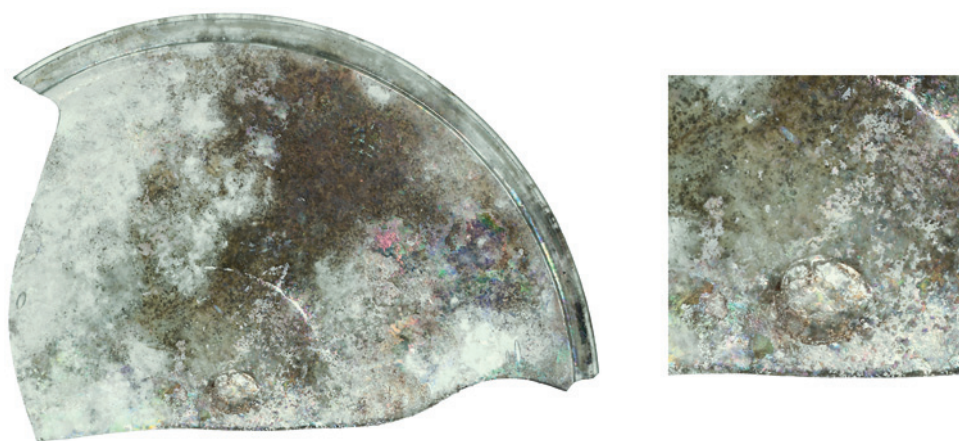


Fig. 39 : Court, Pâturage de l'Envers. La cive est reconnaissable à son bord rabattu, aux cercles concentriques imprimés par la rotation, et surtout par la marque de pontil en son centre. Ech. 1:1. A droite, agrandissement de la marque. Ech. 2:1.



167 Loibl 2003, 103-107.

168 Horat 1986, 176 et 238.

Traduction : « onze fenêtres anglaises à seize verres chacune ». Le terme de « fenêtre anglaise » n'est pas très éloquent. Fait-il référence à une fenêtre à guillotine ou à vantaux s'ouvrant sur l'extérieur ? À cette date, le verre utilisé provenait de la quatrième verrerie de Court. Nous ne savons pas s'il s'agissait de calottes découpées ou de carreaux.

169 Voir note 153.

qualités de verre nouvelles. Werner Loibl en fait la démonstration dans son excellent article de synthèse consacré au vitrage<sup>167</sup> : les « bessere scheiben » ou « helle scheiben », soit les cives les plus claires, sont opposées aux « gemeine scheiben », les cives communes, soit celles en verre commun, de couleur verdâtre. En 1731 ou 1732, un fenêtrier bernois de Sumiswald confectionna, pour la cure de Marbach LU, onze « liechter englische fänster », composées chacune de « 16 Scheyben Courter Wyssglas ». Cette commande « étrangère » de verre incolore suggère que la qualité des verres blancs produits à Court devait être assez haute<sup>168</sup>.

Montées au plomb sur un châssis de bois, les cives habillaient aussi bien la façade de la ferme que celle de la maison bourgeoise urbaine. En général, la dimension des cives oscille entre 9 et 12 cm environ ; Loibl indique une taille maximale de 15 cm, mais nous avons vu que Venise produisait encore à la fin du 16<sup>e</sup> siècle des cives de trois tailles au moins<sup>169</sup>. Les fenêtres pouvaient ne présenter qu'un seul module de cive ou en combiner des rangées de diamètres différents. Une certaine tolérance était admise, car les cives étaient confectionnées de façon rapide, et leur mise en plomb permettait de masquer les différences de diamètres.

### 3.4.1.6 Données quantitatives et répartition spatiale

Plus de 7300 fragments de cives ont été collectés sur le site du Pâturage de l'Envers (fig. 32). Aucune mesure systématique n'a été réalisée sur l'ensemble des tessons. Par contre, une étude statistique restreinte a été réalisée sur les deux ensembles clos (cont. 75471 et 77045), qui paraissent représentatifs. Après élimination d'environ la moitié des fragments, inadaptés ou trop petits pour que leur diamètre puisse être mesuré, nous avons procédé à la détermination du diamètre des pièces restantes. Les mesures révèlent quatre valeurs récurrentes dans l'ordre de fréquence d'apparition suivant : 10, 9, 8 et 12 cm (fig. 40). Comme les cives sont soufflées à la volée et façonnées à l'œil, sans véritable gabarit de contrôle, elles présentent de petits défauts et ne sont pas toujours parfaitement circulaires. La grande majorité des pièces, plus de 90 %, mesurent 9 ou 10 cm ; les cives mesurées à 8 et 12 cm paraissent, elles, tenir plutôt du cas isolé ou peu fréquent. Il se pourrait que celles de 8 cm, en cas de déformation, se rapportent en fait à la gamme de diamètre immédiatement supérieure. Malheureusement, les pièces complètes qui permettraient d'asseoir des valeurs plus précises font défaut. En conséquence, il apparaît envisageable que le site ait produit des cives de trois diamètres : 9, 10 et 12 cm. En outre, il convient de signaler ici déjà que l'essentiel de la production était réalisée en verre commun ; pour les détails se référer au chapitre 3.3.2.

Les cives se concentrent dans les secteurs A et C, avec respectivement 92,7 % et 6,3 % des fragments collectés. Elles apparaissent en force dans les zones 4.3 et 5 du secteur A (fig. 41), où elles représentent respectivement 23 et 40 % du corpus, le reste étant distribué de façon assez homogène sur les zones restantes. Les cives sont aussi bien présentes dans les horizons d'occupation et de démolition des bâtiments

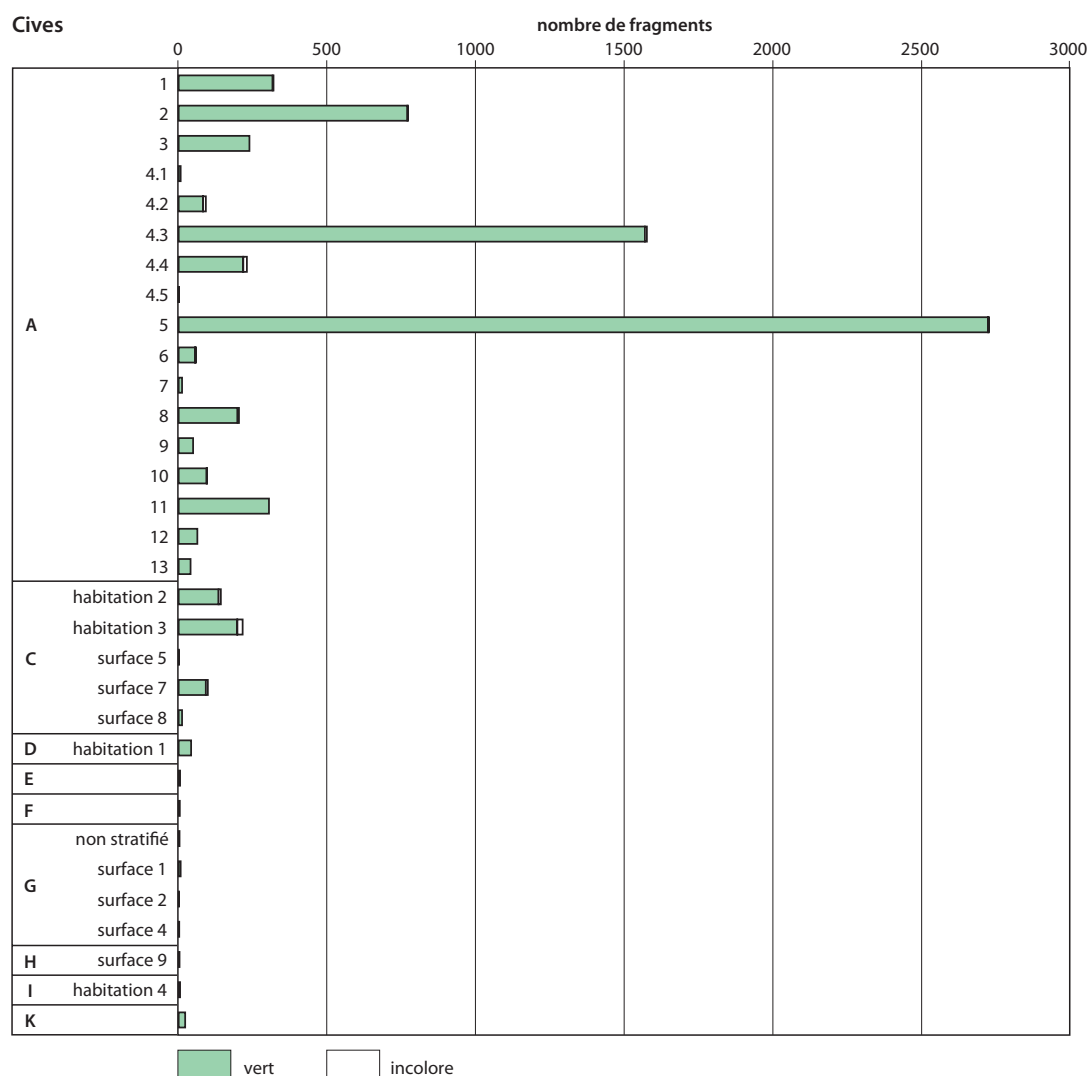
d'habitation 1 à 3 (secteur C). Par contre, leur présence s'avère discrète dans les espaces périphériques E, F, G, H et K, ce qui doit être mis sur le compte de la technique de fouille adoptée (décapage machine) d'une part, et le prélèvement orienté (tri) d'autre part. Dans le cas de l'habitation 4, qui n'a fait l'objet que de sondages ponctuels, les fragments de cives découverts peuvent se rapporter tant à un essaimage de production qu'à des restes de vitrage ayant appartenu au bâtiment même. La première hypothèse nous paraît plus plausible, dans la mesure où les couches d'abandon de cette habitation ont révélé une forte proportion de carreaux de verre (voir chap. 3.4.1.3 et fig. 36).

La quasi-totalité des fragments mis au jour sur le site se rapporte à une production commune en verre verdâtre (7257 pièces). S'il y a bien des nuances allant du vert clair au vert foncé, celles-ci peuvent être dues à la matière même, à l'épaisseur du verre ou à son degré de corrosion. Nous avons bien observé des pièces plus claires que nous avons classées en incolore. Mais celles-ci ne représentent, ensemble, que 1 % du corpus de cives. La concentration de cives observée dans la moitié méridionale de la halle trahit-elle une spécialisation de certains verriers ou est-elle le fruit du hasard ? Dans le premier volume, nous avons fait remarquer la présence d'un amas cendreuse-sableux (A111a) à proximité de la grande fosse A103a et de l'angle sud-ouest de la halle<sup>170</sup>. Sur la base des observations archéologiques et des parallèles retrouvés dans la littérature, nous avons proposé de rapporter ces structures à la production de ce type de vitrage. Cette hypothèse, confortée par les données quantitatives, invite donc à restituer au moins un banc de verrier entre l'estrade et la paroi méridionale de la halle, de préférence à proximité de l'amas cendreuse ou de la fosse susmentionnés. A moins qu'un banc sommaire n'ait existé sur l'estrade et que les cives, après collecte, n'aient été déposées dans ladite fosse cendreuse.

contexte	nombre de cives total	répartition selon diamètre				nombre de cives total	répartition selon diamètre en %			
		8 cm	9 cm	10 cm	12 cm		8 cm	9 cm	10 cm	12 cm
77045	167	3	19	58	2	82	3,7	23,2	70,7	2,4
75471	841	12	94	315	9	430	2,8	21,9	73,3	2,1

Fig. 40 : Court, Pâturage de l'Envers. Tableau récapitulatif des diamètres de cives les plus fréquents mesurés sur deux lots représentatifs.

Fig. 41 : Court, Pâturage de l'Envers. Distribution des cives par secteur et zone.



### 3.4.1.7 Triangles, découpes, vitraux

Au sein du corpus de verre plat, un ensemble de pièces de forme géométrique, caractérisées par de petites encoches rapprochées retient l'attention. Il s'agit de verres découpés au moyen d'un outil spécifique au vitrier, le grésioir, une sorte de manche métallique muni d'une encoche à chacune des extrémités. On dénombre 66 pièces de forme triangulaire et 2 de forme rectangulaire. Les premières étaient destinées à combler les vides laissés par les cives disposées en rangs serrés, afin d'obtenir des vitrages à peu près étanches. Les seconds, nettement plus rares, proviennent peut-être de petits vitraux de cabinet. Leur distribution spatiale révèle une forte concentration dans le secteur A (91 %), le reste se répartit entre le secteur C, E et K (fig. 43). Les triangles retrouvés au Pâturage de l'Envers ont été réalisés en ma-

jorité sur des carreaux, mais on en trouve aussi qui ont été grugés dans des cives (15), un fragment de calotte (1) ou un tesson de paroi (1). La forme de ces triangles varie peu : en principe, ils sont isocèles, mais leurs côtés peuvent présenter une courbure plus ou moins prononcée (fig. 42). Certains présentent une surface opaque, à l'aspect brunifié et mat, dont l'origine nous est inconnue. Il pourrait s'agir d'un processus de dégradation ou d'un enduit type « grisaille » visant à ternir le verre, peut-être dans un but décoratif. En sus, parmi les formes géométriques particulières, on note encore la présence de deux rectangles grugés et d'un losange.

La découpe au grésioir ou à la roulette n'est pas particulièrement complexe à exécuter. Mais, au vu du nombre tout de même restreint de triangles retrouvés sur le site, il nous apparaît que leur réalisation ne constituait pas

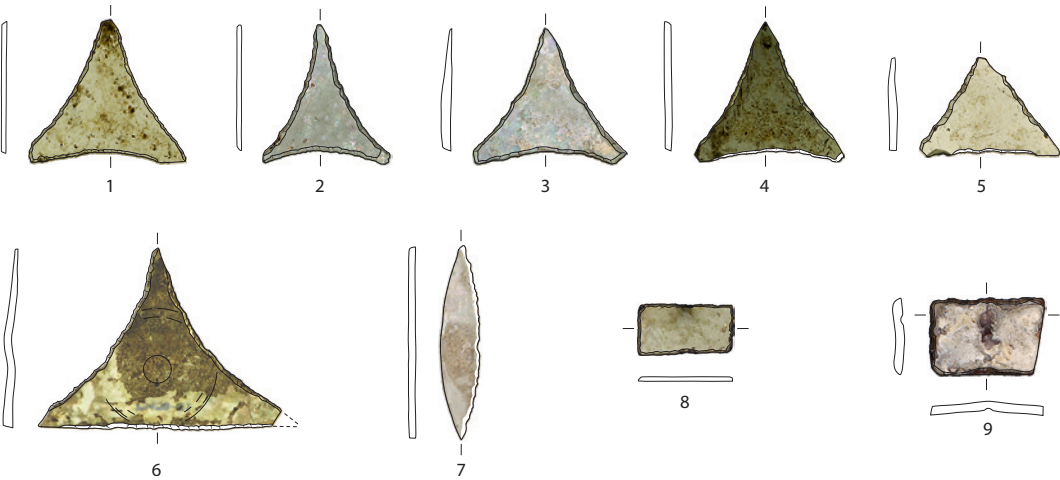


Fig. 42 : Court, Pâturage de l'Envers. Verres à vitre grugés. 1-6 triangles intercalaires destinés à combler les intervalles entre les cives d'une fenêtre. La pièce 6 est réalisée sur une cive épaisse, les autres sur carreau. 7-9: losange et rectangles affectés, par exemple, à la confection de petits vitraux de cabinet. Ind. 1660, 1718, 4443, 4444, 4619, 4803, 4806, 5886 et 11697. Ech. 1:2.

une spécialité de nos verriers. Bien plus, il appartient au fabricant de fenêtres, menuisier ou vitrier, de réaliser ces découpes triangulaires et de les adapter aux cives, dont il dispose, puisque leurs dimensions peuvent varier. Ainsi sommes-nous d'avis qu'il s'agit ici plutôt d'éléments récupérés ou peut-être perdus au cours de manipulations ou d'un déménagement.

Un second groupe de verres géométriques a été identifié. Il rassemble des pièces marquées de fines stries linéaires gravées au moyen d'une pointe dure ou même d'un diamant. Le corpus compte 25 triangles et 1 rectangle. La plupart des exemplaires sont de couleur verte (17), le reste est de teinte incolore (9). Ces éléments se concentrent dans le secteur A; trois exemplaires seulement proviennent du secteur C (habitation 2). La fonction de ces fragments disparates nous échappe. Les stries observées sur une ou l'autre des faces découlent de l'usage d'un outil pointu d'une grande dureté: diamant ou plus vraisemblablement silex taillé. Des silex en forme de « pierres à fusil » ont été retrouvés sur le site et ont parfaitement pu servir à rayer, marquer, les zones de découpes. Ces incisions rappellent celles observées par Kaufmann dans son étude des rejets d'un atelier de vitrier médiéval<sup>171</sup>. La distribution des verres grugés, découpés et des vitraux révèle une concentration dans l'espace de production d'où proviennent 90 % des exemplaires. Un lien étroit entre la halle et ces catégories de matériel semble donc transparaître. On peut admettre qu'une partie des

secteur	zone	triangles grugés div. couleurs	découpes			vitraux
			vert	incolore	autre	
A	1	1	3	0	0	1
	2	10	10	6	5	0
	3	5	5	0	2	4
	4.1	0	1	0	0	0
	4.3	30	42	23	3	10
	4.4	2	4	3	0	2
	5	17	19	19	1	3
	6	0	0	1	1	1
	8	6	12	0	1	1
	9	0	0	1	0	0
	11	4	4	4	0	2
C	13	0	1	0	0	0
	sous-total	75	17	6	2	4
	habitation 2	6	3	1	1	2
	habitation 3	1	1	2	1	0
	surface 7	0	0	0	0	1
D	surface 8	0	0	0	0	0
	sous-total	7	4	3	2	3
E	habitation 1	1	1	1	0	0
		0	1	0	0	0
		1	2	0	0	0
total général		84	109	61	15	27

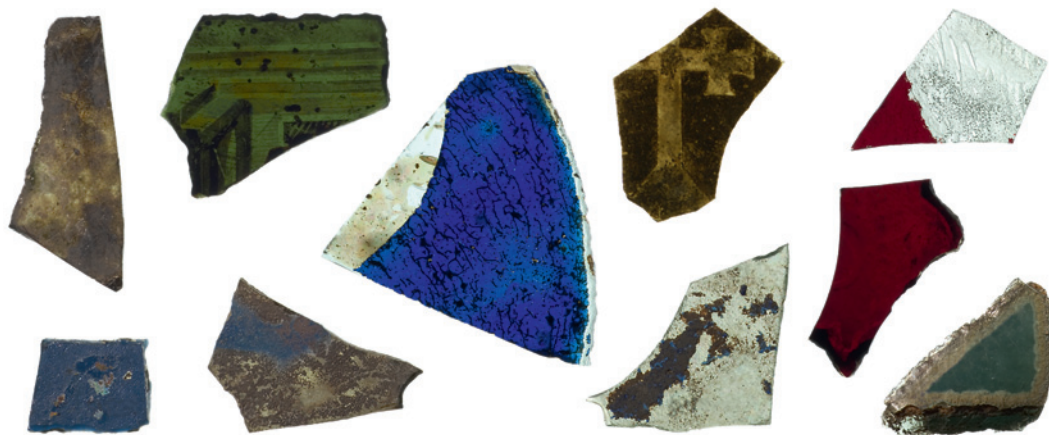
Fig. 43 : Court, Pâturage de l'Envers. Répartition par secteur et zone des triangles grugés, découpes et fragments de vitraux collectés.

verres plats aient été découpés dans la halle, plus précisément dans l'espace situé au sud du four (zone 4.3) qui livre, à lui seul, plus du tiers de ces verres. Par contre, les fragments de vitraux (fig. 44) paraissent étrangers au site du Pâturage de l'Envers et ont probablement été récupérés ou collectés pour une raison qui nous échappe. A moins qu'ils ne proviennent de vitraux familiaux<sup>172</sup>.

171 Kaufmann 2010, 135, fig. 54 et 335, pl. 23. Des fragments de silex ont par ailleurs aussi été retrouvés dans le corpus de cet atelier.  
172 Pour information, de telles reliques de vitraux de cabinets sont aussi connues à la verrerie de Court, Sous les Roches. SAB, cont. 100620.



Fig. 44 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragments de verre colorés, doublés, peints à la grisaille (?) ou parfois gravés à l'acide, retrouvés sur le site, mais dont la production sur place reste peu probable. Ech. 1:1.



### 3.4.1.8 Verres en calotte

Au sein du verre plat, une catégorie particulière, peu traitée par les chercheurs, a été identifiée sur le site du Pâturage de l'Envers. Il s'agit d'un verre circulaire, en principe incolore, obtenu à partir d'une paraison soufflée en boule, puis aplatie sur une surface plane. Contrairement à la cive, il ne présente ni bord rabattu, ni ombilic central. Son examen attentif révèle de discrètes traces de rotation qui découlent plutôt de la préparation de la paraison que d'un procédé de fabrication par rotation rapide. Le diamètre de ces verres peut atteindre une vingtaine de centimètres.

Sebastian Strobl fut un des premiers à décrire ce type de vitrage, qu'il nomma « Tellerscheiben », littéralement verre en assiette<sup>173</sup>. Il imagine un procédé de fabrication qui rappelle la confection du verre en plateau, mais s'en distingue par l'absence de reprise au pontil (fig. 45). En effet, après que la paraison ait pris la silhouette d'une sorte de grande cloche à base fermée et aplatie, le verre est décalotté. Cette opération se déroule probablement au-dessus d'un lit de cendres qui amortit la chute de l'objet ou sur une planchette de bois humide. Strobl précise que récemment encore, au 20<sup>e</sup> siècle, les verriers de l'usine Lamberts soufflaient des verres en calotte similaires en usant de moules en bois. D'après le même auteur, les calottes actuelles sont plus épaisses que celles réalisées au 17<sup>e</sup> siècle. La séparation de la calotte pouvait se réaliser au moyen d'un filet de verre chaud, d'une incision continue au moyen d'une lame mouillée ou par l'application d'un fer chaud. Il reste alors un léger rebord qui est supprimé par une série d'incisions linéaires

réalisées au moyen d'un gabarit et d'un outil griffant le verre, probablement un silex taillé. Plus rares sont les pièces reprises au grésioir. Loibl trouve le terme de « Tellerscheiben » impropre et estime pour sa part qu'il s'agit des « Spiegelscheiben » (verres à miroir), dont il est fait mention dans certains documents à partir du 17<sup>e</sup> siècle<sup>174</sup>. Leur transparence témoigne au besoin des efforts menés par les verriers, germaniques notamment, pour rivaliser avec les produits vénitiens. Un usage comme vitrage monté au plomb, à l'image des cives, est naturellement envisageable, car la clarté du verre et la dimension plus grande des verres avaient pour corollaire un effet de transparence et une qualité de lumière nettement supérieurs aux cives. De grands verres circulaires de ce type sont attestés par l'iconographie mais aussi par de nombreux monuments historiques. Stefan Trümpler, Directeur du Vitrocentre de Romont FR, nous a suggéré un troisième usage : il estime que ces disques parfaitement transparents et sans ombilic étaient également appréciés des peintres sous verre qui confectionnaient des vitraux de cabinet. Cette remarque intéressante nous rappelle une facette particulière de l'usage de ces grands verres circulaires, découpés au besoin, dont la fabrication connaît, en Europe, un essor particulier aux 17-18<sup>e</sup> siècles<sup>175</sup>.

Kinga Tarcsay fut, à notre connaissance, la première à identifier formellement de telles calottes issues de fouilles archéologiques<sup>176</sup>. Celles-ci mesuraient entre 13 et 14 cm de diamètre pour une épaisseur de 1 à 1,4 mm. Les exemplaires retrouvés sur le site du Pâturage de l'Envers étaient plus grands et atteignaient entre 14 et 20 cm (fig. 46). Seule la partie in-

173 Strobl 1990, 67-68 reprenant Robert Seiz, le premier à en avoir parlé (Seiz 1979). A la page 318 de leur lexique, Ryser et al. 2000 traduisent le terme par « cives aplaties ou moulées », peu approprié puisque cive désigne un verre à vitre circulaire repris au pontil. Nous lui préférons le terme de calotte.

174 Loibl 2003, 105.

175 Communication orale faite à Romont FR à l'occasion des assises du Groupe de travail suisse pour l'archéologie du Moyen Âge et de l'Époque moderne du 26-27 octobre 2007. Nous avions à cette occasion présenté des calottes issues de la fouille du Pâturage de l'Envers.

176 Verreries de la Seigneurie de Reichenau (AT) : Tarcsay 2008, 172-176; Tarcsay 2009, 193-198.

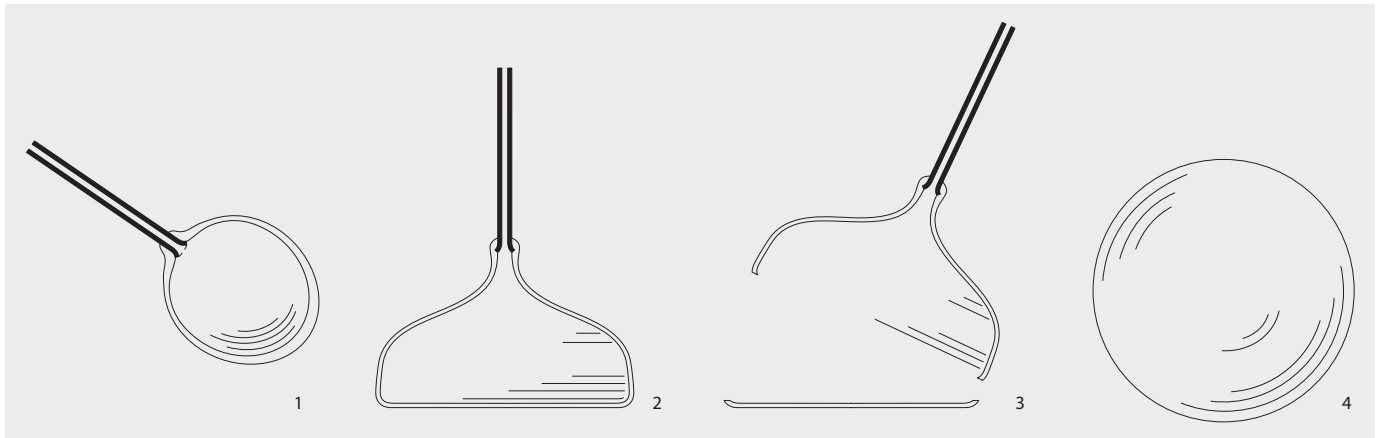


Fig. 45 : Court, Pâturage de l'Envers. Reconstitution du principe de fabrication du verre en calotte d'après Strobl 1990, 68, fig. 7.



Fig. 46 : Court, Pâturage de l'Envers. Deux exemples représentatifs de verre en calotte produits sur le site. L'orifice visible correspond à l'attache de la canne à souffler. Ech. 1:3 .

férieure de la calotte est utilisée, le reste est éliminé comme déchet. Dans de nombreux cas, l'attribution des tessons à la partie supérieure ou inférieure de la calotte est impossible, aussi la détermination des épaisseurs effectives est-elle peu évidente. Les tessons les plus minces susceptibles de se rapporter à la base de la calotte révèlent des épaisseurs qui oscillent entre 1 et 2 mm. Près de la moitié des tessons identifiés présentent un mauvais état de conservation : verres opacifiés, poreux ou à surface feuilletée, rendant difficile l'identification de leur couleur. Cet état pourrait peut-être s'expliquer par une recuisson insuffisante, voire absente ? On en trouve de différentes teintes, tirant tantôt sur le vert, tantôt sur l'incolore plus ou moins pur (fig. 47). Des traces d'incisions réalisées au moyen d'une pointe ou d'un tranchant sont clairement visibles. Par endroit, il est même possible d'observer une succession de petites stries obliques par rapport à la ligne de découpage.

Les deux exemplaires les mieux conservés (fig. 46) proviennent de la zone 11 du secteur A ; ils ont été retrouvés au sein des mêmes couches, à l'intérieur de la halle, au pied de la paroi est<sup>177</sup>. Le premier, conservé à près de 50 %, révèle un diamètre de 14,5 cm. La calotte inférieure est particulièrement fine avec une épaisseur de 1 mm. Le verre de teinte vert-jaune présente des traces d'irisation et de brunification. L'ouverture sur la partie supérieure de la calotte matérialise l'emplacement de la canne à souffler, dont le diamètre intérieur au niveau de l'embouchure n'excédait pas 10 mm. Le second exemplaire offre un diamètre plus grand atteignant 17,5 cm. Près d'un tiers de la calotte inférieure et la moitié de la calotte supérieure sont conservés. L'emplacement de la canne à souffler est visible, mais l'état de la pièce n'autorise aucune indication de diamètre intérieur minimal de la canne à souffler. Le verre de couleur verte présente des reflets jaunes et des stries de rotation perceptibles

177 Contextes n° 78197 et 81907 ; pos. A223 et A225.



Fig. 47 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragments de calottes découpées. A gauche, les bords rectilignes de découpe sont bien visibles. On remarque aussi quelques incisions linéaires. Ech. 1:2.

sur la face extérieure. Sa surface offre un degré avancé d'irisation. Les diamètres restitués pour les autres bords de calotte découpés les mieux conservés se situent entre 16 et 19 cm<sup>178</sup>. Les dimensions de l'exemplaire le plus petit paraissent assez éloignées de la moyenne, ce qui pourrait nous porter à l'interpréter plutôt comme une pièce ratée.

L'usage des moules de fabrication mentionnés par Strobl n'est pas attesté à Court, le bois n'étant pas conservé. Mais l'utilisation d'un marbre métallique ou d'une dalle de pierre<sup>179</sup> parfaitement lisse, posée à même le sol, aurait très bien pu faire l'affaire. L'avantage du moule de bois réside dans sa capacité d'absorption des chocs éventuels occasionnés par le détachement de la canne. A notre avis, la grande variabilité des diamètres mesurés à Court contredit l'hypothèse de l'usage de moules en bois, auquel cas plusieurs formes eussent été nécessaires.

Cette méthode de fabrication reste très gourmande en verre, puisque seule la partie plane est utilisée, encore qu'elle nécessite l'élimination du rebord par une série de découpes. Tarcsay a mis en évidence deux formes de découpe : en hexagone et en quadrilatère réguliers. Dans le cas de notre verrerie, les découpes ont peut-être été réalisées de façon moins soignée, car nous n'avons pas pu reconstituer de polygones absolument réguliers. Mais peut-être les masques utilisés étaient-ils des quadrilatères (carrés ou rectangles) de dimensions diverses, destinés à fournir de petits carreaux ?

### 3.4.1.9 Données quantitatives et répartition spatiale

Si les tessons de verre en calotte sont aisément identifiables lorsqu'ils présentent l'amorce arrondie de la partie pansue de la paraison, il n'en va pas de même des nombreux fragments dépourvus de rebord, qu'il n'est souvent pas facile de distinguer d'un tesson de carreau. Certains éléments portent de fines incisions, exécutées au moyen d'une pointe, d'un diamant, d'un silex taillé, voire peut-être d'une roulette métallique. Ces rayures sont similaires à celles observées sur certains triangles taillés ainsi que sur les verres découpés (voir chap. 3.4.1.7). Les données statistiques qui suivent se rapportent aux éléments clairement identifiés et n'ont qu'une valeur indicative qui permet de situer globalement la fabrication de ce type de verre au sein de l'éventail plus large des productions de cet atelier.

En tout, on dénombre 1120 fragments de verres en calotte : 1070 pièces se rapportent à la catégorie des verres incolores (90 % sont imparfaits et tirent sur le jaune pâle ou le rose clair) et 50 sont de couleur verte. Il ressort que les pièces vertes forment plutôt l'exception, alors que l'essentiel de la production est orientée vers des verres incolores d'une bonne transparence. Le secteur A, plus particulièrement dans les zones 1, 4.3 et 5, concentre 88 % des fragments (fig. 48). La zone 11 (9 % du corpus) a livré les fragments de calotte les plus complets (fig. 46) ; ils ont été retrouvés en bordure

178 Contextes n° 77077, 77503, 78239 et 78291.

179 Diderot parle d'un paupoire : Diderot/D'Alembert 1765a, 207 ; Diderot/D'Alembert 1765c, 109 et 112.

intérieure de la halle et ont permis d'identifier sans équivoque cette catégorie particulière de verre plat. Les calottes demeurent peu répandues dans la zone d'habitat (secteur C) où seule une centaine de tessons, dont près de la moitié proviennent de la surface 7, ont été récoltés. Sur la base des observations qui précèdent, nous sommes en droit d'envisager un découpage des bords de calottes dans la halle et peut-être aussi dans l'étenderie.

### 3.4.1.10 Commentaire

La mise en évidence, sur le site du Pâturage de l'Envers, d'une production conjointe de cives et de carreaux, tirés de manchons soufflés, révèlent la coexistence, encore au début du 18<sup>e</sup> siècle, de besoins régionaux diversifiés. La cive, quoiqu'un peu désuète à cette époque, reste un produit de masse bon marché, dont l'utilisation reste acceptable malgré une faible

transparence et un effet déformant. Comme sa mise en plomb demeure coûteuse et que le carreau plat la concurrence sérieusement, on peut penser que son usage disparaissant, elle va servir aux réparations d'anciennes fenêtres. Mais si les cives sont produites directement dans la halle, les cylindres refendus, destinés à la fabrication de carreaux, sont eux transférés à l'étenderie, une installation séparée, aménagée non loin de la zone d'habitation. Michel<sup>180</sup> rappelle, en parlant des verreries forestières jurassiennes, que « le four à étendre était toujours situé en dehors la halle, près du jardin, (...) abrité dans une baraque en bois, couverte de bardeaux ». Ce fut aussi le cas au Pâturage de l'Envers. Au vu de sa localisation (fig. 1, surface 7), nous avons même suggéré qu'il s'agissait d'une installation privée<sup>181</sup>, éventuellement partagée avec un autre verrier. Mais à l'évidence, le verre au manchon n'a jamais été une production d'envergure dans cette petite

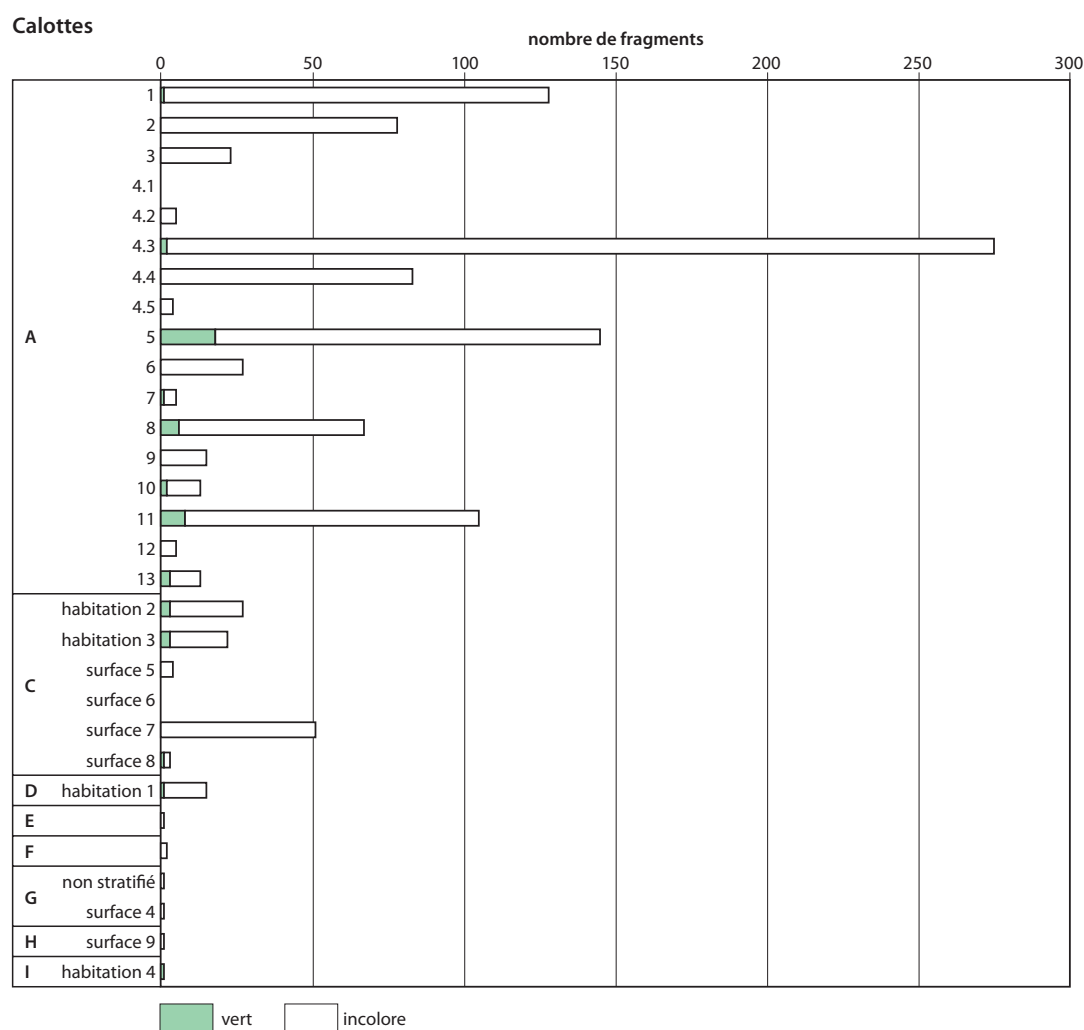


Fig. 48 : Court, Pâturage de l'Envers. Distribution des fragments de calottes par secteur et zone.

180 Par exemple, dans les verreries établies au fil du Doubs à Biaufond (CH), Blancheroche (FR) et Mielin (FR), Michel 1989, 235-236 et notes.

181 Gerber 2010, 84-85 et 180.



Fig. 49 : Ferenbalm BE, Jerisberghof, Althuus. Fenêtres à guichet combinant l'usage de grands verres en calotte et de petits carreaux circulaires découpés de différentes tailles sertis de plomb. Les vergettes de fer assurent une certaine rigidité à l'ensemble. Façade sud de la ferme datée de 1703.



manufacture courtesane. Elle s'apparente plus à un essai de diversification, entrepris par un verrier, vraisemblablement le propriétaire de l'habitation 3. Les raisons qui menèrent au démantèlement partiel de l'étenderie (destruction du four C234) demeurent obscures. Production peu rentable ? Qualité insuffisante ? Départ pour une autre verrerie ? Nous ne possédons aucun indice. Une note relative à la verrerie d'Esserdilles au bord du Doubs pourrait suggérer un début d'explication : la production de verre au manchon et de gobeletterie nécessite des températures de four de fusion différentes, à l'origine de conflits entre verriers œuvrant simultanément sur des productions différentes<sup>182</sup>. La fabrication de verre à vitre nécessite une température de four plus élevée, ce qui implique une consommation de bois supérieure.

La production du verre en manchon et du vitrage en général connaît, selon les régions, un essor remarquable au 17<sup>e</sup> siècle : le verre remplace les derniers châssis couverts de toile, de papier huilé ou de parchemin. A mesure que le siècle avance, le vitrage devient plus accessible et les techniques de fixation évoluent : la fenêtre à petits bois ou croisillons apparaît et remplace peu à peu le vitrage serti au plomb<sup>183</sup>.

La seconde moitié du 18<sup>e</sup> siècle verra l'explosion de la production du verre au manchon. Les techniques de fabrication se transforment : les fours grandissent, deviennent plus performants et accueillent des creusets contenant plusieurs centaines de kilos de verre. Parallèlement, la longueur et la section des cylindres soufflés augmentent, autorisant du même coup la confection de carreaux plus grands adaptés aux nouvelles baies plus hautes et plus larges<sup>184</sup>. Certaines verreries s'en font même une spécialité, comme celle du Bief d'Etoz ou de Miellin en Franche-Comté voisine, d'autres réorientent leur production à l'image de Blancheroche qui, spécialisée dans la gobeletterie, se lance vers 1753 dans le vitrage pour des questions de profit<sup>185</sup>. La tentative de production du verre en manchon à Court n'est donc pas une coïncidence, mais s'insère parfaitement dans un élan nouveau qui fait la part belle au carreau en raison de ses dimensions modulables, de son épaisseur régulière et de sa transparence, qui surpassent celle de la cive.

Quant aux verres en calotte, d'un diamètre plus grand et sans trace de pontil, ils concurrencent eux aussi les petites cives, même s'ils nécessitent une découpe post-formage. Les pièces les plus transparentes intéressent non

182 Schwab (s.d.), 45 et 48.

183 Woronoff 2009, 135.

Cette technique attestée au Moyen Âge est réservée aux demeures des élites fortunées.

184 Roussel 2009, 177-181.

185 Michel 1989, 255-256.



Fig. 50 : Exemple d'une peinture sous verre réalisée sur une calotte soufflée. Représentation de Sainte Agathe, patronne invoquée par différents corps de métier liés au feu, dont la verrerie, qu'elle protégerait des incendies. Beromünster LU, peintre : Cornel Suter (?), vers 1780, ø 17,4 cm. Romont FR, Vitromusée (n° inv. VCR RY 432).

seulement les fenêtriers (fig. 49), mais aussi, dans le registre de l'art populaire, les peintres sous verre (fig. 50), dont l'activité connaît en Europe un essor remarquable au 18<sup>e</sup> siècle<sup>186</sup>. La production de verre en calotte paraît rester, au vu des quantités limitées de déchets retrouvés, assez marginale sur ce site.

### 3.4.2 Verre d'assortiment

A côté des nombreux déchets de production et du verre plat, le corpus de notre site comporte un large éventail de formes soufflées regroupées sous le terme générique de verre d'assortiment. Au total, cela représente 8631 tessons identifiables, dont 3726 fonds, 2626 parois et 2279 bords<sup>187</sup>. Chacun a été comptabilisé, pesé et entré dans la base de données générale (voir chap. 3.3). Les cinq catégories de couleurs retenues pour les déchets, soit vert, incolore, bleu, opaque<sup>188</sup> et filigrané, ont été reprises pour les autres tessons. Un sixième groupe réunit les couleurs particulières, peu courantes sur le site, et dont la production sur place n'est pas assurée.

Au sein des bords, nous avons décidé de comptabiliser, en sus des bords véritables, les petits objets finis et souvent complets, tels les

anneaux, les fusaïoles, les lissiers, les boutons de vêtement, les perles, les bouchons et autres bobines. Ces objets n'entrent dès lors jamais dans les décomptes de fonds ou de parois. Si la distinction entre un fragment de paroi et celui d'une calotte soufflée n'est pas toujours aisée, quelques critères morphologiques facilitent néanmoins l'identification de la majeure partie des tessons : la présence d'un motif moulé ou rapporté, la forme générale (par exemple corps cylindrique ou coupe tronconique), la qualité du verre, en général meilleure après recuisson. Nous avons ajouté aux parois les tubes ainsi que les différents petits éléments rapportés, tels les anses et les boutons de préhension. L'identification des fonds pose rarement des difficultés. Les fragments de paroi présentant une amorce de fond, dont la forme n'est pas clairement définissable, sont comptabilisés comme parois. Les pieds annulaires, les tiges et les jambes des verres à pied rejoignent la catégorie des fonds.

Le verre d'assortiment produit au Pâturage de l'Envers se répartit en deux grands groupes : les verres de stockage et de laboratoire, et ceux destinés à la table. Quelques objets particuliers non attribuables à l'une de ces deux catégories complètent encore le panel de production.

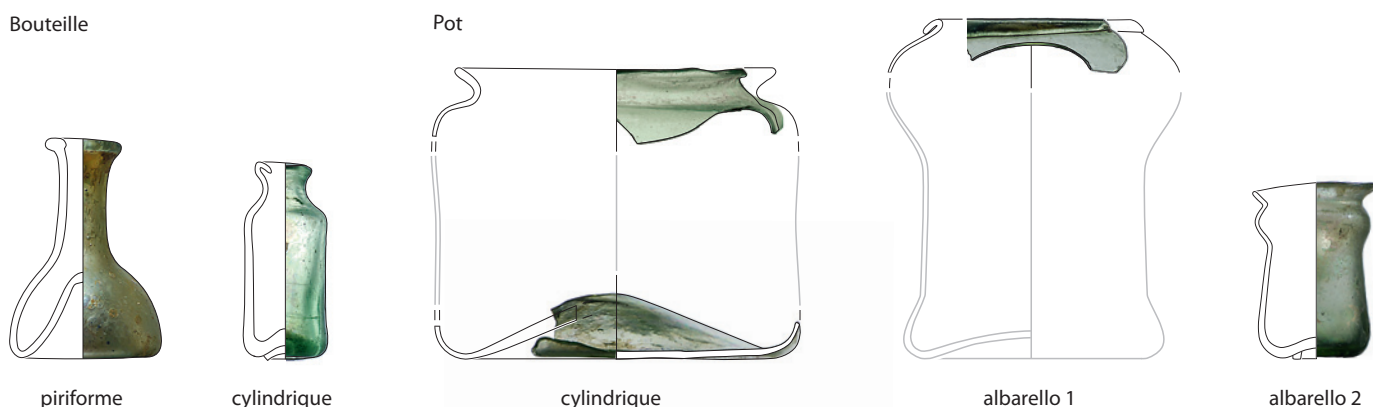
186 Nous remercions Yves Jolidon, du Vitrocentre de Romont FR, de nous avoir signalé, à titre d'exemple, la calotte peinte représentée à la fig. 50 du présent ouvrage. Au sujet de la peinture sous verre en Suisse, consulter : Ryser et al. 2000.

187 La faible représentation des parois s'explique par les clefs de tri appliquées dès la seconde campagne de fouille (voir chap. 3.2)

188 Le verre opaque est généralement blanc, parfois orné d'un décor peint et plus rarement marbré.

## Pharmacie

### Bouteille



## Stockage

### Bouteille

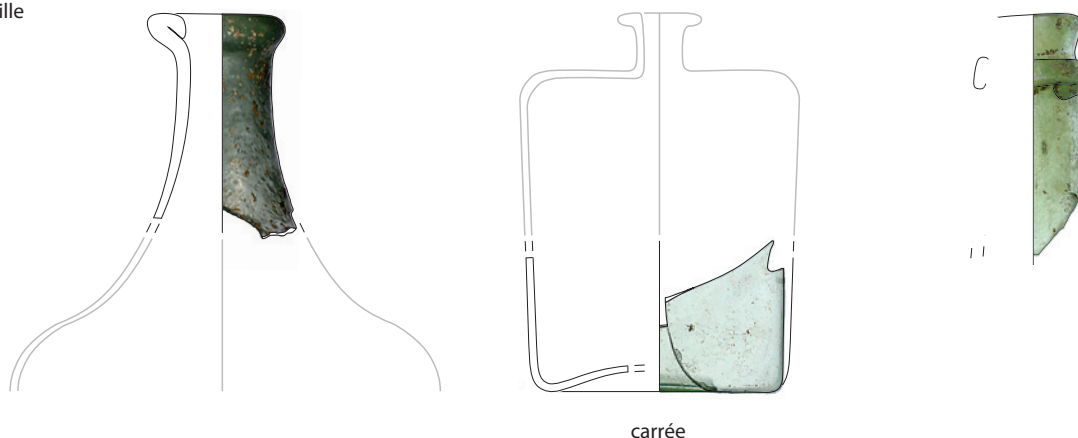


Fig. 51 : Court, Pâturage de l'Envers. Tableau figurant les principales productions à caractère pharmaceutique ou destinées au stockage de liquide.

### 3.4.2.1 Verre de stockage et de laboratoire

Les contenants servant au stockage de substances solides, liquides ou pâteuses représentent une part importante de la production du site, si ce n'est la principale. On y note, en particulier, les verres de pharmacie/laboratoire: petites bouteilles à corps piriforme ou cylindrique, bouteilles à corps carré ou rectangulaire, pots à onguent (fig. 51), etc. Les bouteilles de pharmacie représentent près des trois-quarts des pièces attribuées à la catégorie *pharmaciellaboratoire* et plus du tiers des individus identifiés toutes catégories confondues. Elles constituent un ensemble dominant qui témoigne d'une confection de masse.

Parallèlement au corpus « pharmaceutique », on relève la présence de bouteilles destinées à la conservation du vin ou éventuellement d'autres boissons alcoolisées (fig. 51). La grande majorité fut réalisée en verre commun, mais on compte quelques rares exemplaires en

verre incolore ou bleu qui se rapporteraient plutôt au service de table. Leur état fragmentaire et la difficulté de réaliser des remontages valables suggèrent une refonte partielle des tessons, ce qui empêche la restitution de profils plus ou moins complets. Les bouteilles de vin possèdent généralement un col tronconique élancé, un bord éversé parfois souligné d'un cordon rapporté. Plusieurs pièces présentent un bord éversé, replié vers l'intérieur et aplati. Le corps des bouteilles reste souvent difficile à identifier faute de remontage satisfaisant. Leur fond est refoulé ou parfois juste bombé.

Des formes nettement moins fréquentes sont aussi représentées, à l'image des chapiteaux de distillation et des ventouses. Les chapiteaux de distillation se reconnaissent en principe à leur embouchure tubulaire tronconique et inclinée qui conduit le distillat dans un récipient secondaire. Quand seul le conduit est conservé, l'interprétation définitive reste délicate car d'autres récipients en sont munis: tire-lait, essencier, entonnoir par exemple. Les ventouses



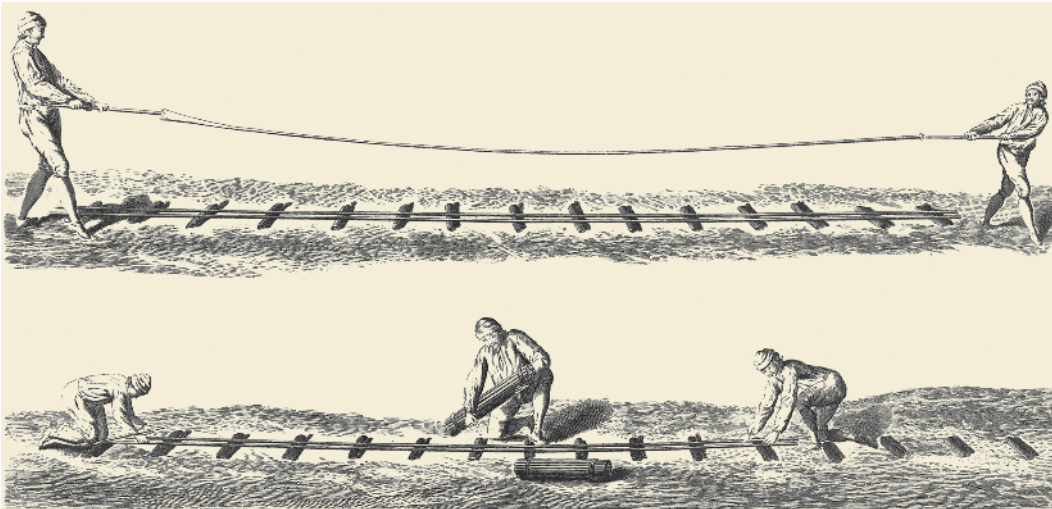


Fig. 52 : Manière de produire les tubes de verre creux. Diderot/D'Alembert 1772/2002, *Verrerie en bois*, première section, pl. XXI.

sont caractérisées depuis la nuit des temps par un fond convexe, un corps circulaire ou piri-forme terminé par un col vertical court, à bord aplati, éversé ou replié.

Enfin, les fragments de baguette ou de tube de verre appartiennent à la catégorie des verres soufflés. Utilisables tel quel, déformables ou adaptables à volonté sous l'effet d'une flamme intense<sup>189</sup>, ils sont destinés plus particulièrement au laboratoire (pipette, éprouvette, etc.) et aux instruments scientifiques (thermomètre, baromètre, etc.). Ces tessons de tubes n'ont fait l'objet d'aucun décompte particulier dans la mesure où leur attribution à un type spécifique d'objet n'était guère possible.

Leur réalisation aisée nécessite deux personnes : le cueilleur, qui prélève une poste de verre qu'il marbre avant de la souffler, et un gamin qui l'assiste dans les opérations d'empontillage, puis d'étirage rapide de la paraison (fig. 52). Le long tube obtenu est soigneusement déposé à terre sur de petites traverses de bois disposées de manière régulière. Après refroidissement à l'air libre, le verre est découpé au moyen « d'une pierre à fusil »<sup>190</sup> ; une rayure superficielle du pourtour de la baguette suffisait à affaiblir le verre qui se rompait ensuite par pression. Le diamètre du tube était déterminé par la taille de la paraison, mais surtout par la masse de verre : plus la paroi de la paraison soufflée était fine, plus le tube pouvait être filé fin. La quantité de verre déterminait, elle, la longueur du tube. Les tubes étaient probablement livrés en lot, attachés au moyen de liens, comme le suggère l'*Encyclopédie*.

N'ayant pas d'extrémité parfaitement définie, comme les bords ou fonds des autres objets, les tubes collectés ont été systématiquement traités comme des éléments de paroi, et n'ont donc pas fait l'objet d'un décompte séparé. Ne connaissant pas la longueur originale, sans doute variable, des tubes réalisés, les données recueillies n'auraient eu qu'un intérêt relatif et n'auraient pas permis de quantification précise. Les diamètres relevés varient de 3 à 15 mm (fig. 53 et 55) ; les plus longs fragments conservés atteignent 153 mm. L'épaisseur du verre varie de 0,5 mm à un peu plus de 2 mm. Les tubes incolores ont un diamètre moyen de 5 mm et une épaisseur oscillant entre 1 et 2 mm. Leurs dimensions et transparence s'accorderaient parfaitement à la confection d'instruments scientifiques (baromètre, thermomètre etc.) Quant aux tubes verts, ils offrent des parois généralement plus épaisses qui atteignent jusqu'à 3 mm. Les exemplaires qui présentent une forme tronconique ou courbée pourraient se rapporter à des objets finis, tels des pipettes, des essenciers ou des huiliers (becs verseurs), des alambics (coudes).

Les tubes constituent aussi la matière première d'une activité verrière singulière : le travail à la lampe. Cette technique consiste à déformer ou faire fondre un tube de verre sous la flamme d'une lampe à huile, attisée au moyen d'un soufflet mécanique (fig. 54). Le chalumeau ainsi obtenu permet d'élever suffisamment la température de la flamme. Si l'origine de cette technique demeure mystérieuse faute d'étude, son développement est bien attesté dès le début du 17<sup>e</sup> siècle. Les premières références

189 Réchauffées sur la flamme d'un chalumeau, les baguettes sont particulièrement destinées au travail à la lampe.

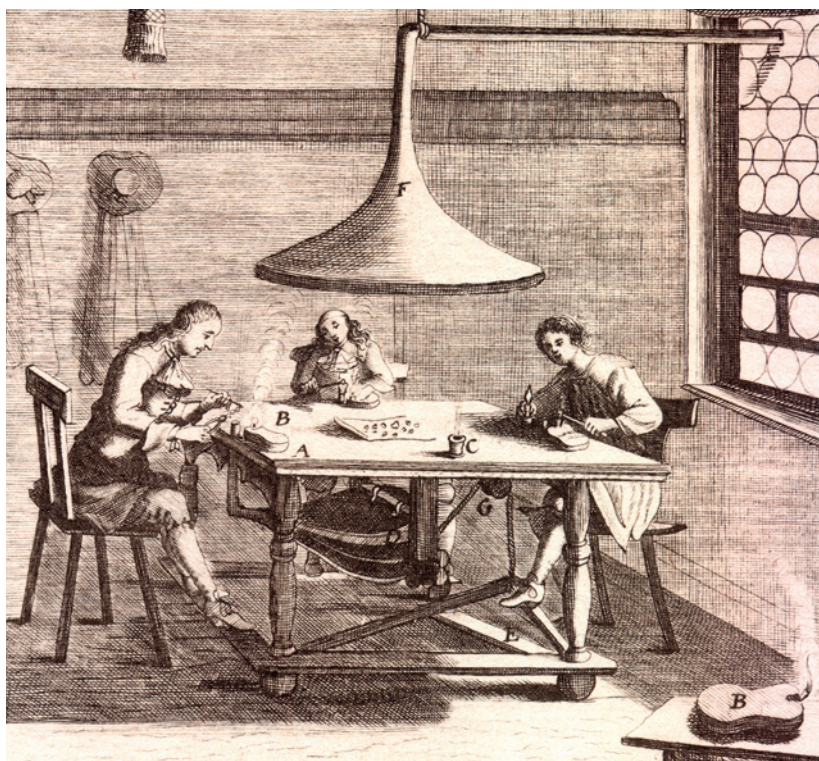
190 Diderot/D'Alembert 1772/2002, *Verrerie en bois*, première section, pl. XXI et commentaires p. 4-5.



Fig. 53 : Court, Pâturage de l'Envers. Sélection de tubes fragmentaires verts et incolores. Ech. 1:2.



Fig. 54 : Travail à la lampe d'après Kunckel 1679/1975b, fig. X.



écrites remontent au début du 17<sup>e</sup> siècle et paraissent se rapporter à Florence et à Murano<sup>191</sup>. Mais le travail à la lampe devait exister dans d'autres cités européennes; Kunckel décrit aussi cette technique à la fin du second livre de son traité<sup>192</sup>. Ce procédé servait à la confection de menus objets, surtout des perles, mais aussi à l'applique de décors sur des objets en verre. On peut se demander si les fioles miniatures retrouvées sur le site (fig. 56) ont été confectionnées selon ce principe. En effet, leur soufflage au moyen d'une canne convention-



nelle n'est guère envisageable en raison du trop grand diamètre de ces dernières.

D'un point de vue archéologique, cette activité laisse peu de traces tangibles: pas d'infrastructure lourde, peu ou pas d'outils spécifiques. Seuls les déchets, en particulier les fragments de tubes aux extrémités plus ou moins fondues, ainsi que les artefacts ratés sont à même de trahir le travail à la lampe. Au Pâturage de l'Envers, le matériel collecté n'a pas permis de mettre en évidence la pratique du travail à la lampe sur place.

### 3.4.2.2 Verre de table

Parmi les verres d'assortiment, on compte la verrerie de table; en particulier les gobelets et les verres à pied, auxquels s'ajoutent divers contenant et objets moins fréquents, dont nous évitons de donner ici le détail, puisqu'ils seront traités de façon exhaustive dans le catalogue du volume 4.

Les gobelets se répartissent en deux sous-groupes: ceux à paroi lisse et ceux à paroi ornée d'un décor moulé (fig. 57). Les pièces lisses sont majoritairement de forme cylindrique et présentent un fond refoulé; les exemplaires à paroi tronconique disposent d'un fond épais. Les gobelets soufflés-moulés sont plutôt cylindriques et décorés de motifs variables: gouttes, larmes, résilles, côtes verticales ou horizontales, effet optique spiralé, etc. Si la majeure partie des verres du premier sous-groupe furent confectionnés en différentes nuances de vert, les pièces tronconiques furent, elles, exécutées en verre incolore. Les gobelets à dé-

191 Ricke 1978, 59-60; Zecchin 1987, 85-88: travail dit « a lume » ou « a lucerna ».

192 Kunckel 1679/1975b, 66-67.



Fig. 55 : Court, Pâturage de l'Envers. Extrémité de tube incolore avec empreinte de mors de canne. Ech. 1:1.

Fig. 56 : Court, Pâturage de l'Envers. Deux fioles miniatures peut-être obtenues par soufflage à la lampe. Ech. 1:1.

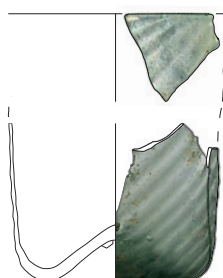
cor répétitif de gouttes ou de larmes ont en principe un fond orné d'un motif radial, que certains chercheurs ont dénommé « soleil radiant ». Quelques gobelets à cordon rapporté au niveau du pied sont aussi attestés. Dans l'ensemble, il s'agit plutôt de productions en verre de qualité ordinaire, c'est-à-dire de couleur verte.

Les verres à boire sur pied représentés se subdivisent en trois sous-groupes distincts : les verres à pied annulaire refoulés (ci-après verres à pied refoulé), les verres à jambe en forme de balustre (verres à jambe) et les verres sur tige pleine (verres à tige).

Les représentants du premier sous-groupe, systématiquement réalisés en verre ordinaire, offrent une coupe lisse ou à motif spiralé. Ce type de verre de facture rapide, exécuté en une seule paraison, constitue une forme archaïsante qui n'est pas sans rappeler certains gobelets tronconiques à pied refoulé rapporté du 16<sup>e</sup> siècle. D'ailleurs, ce type apparaît déjà en nombre dans le corpus de la verrerie de Court, Sous les Roches (1673-1699). Vu leur abondance sur notre site, plus de 300 individus recensés, il apparaît que ces verres à pied refoulé restent en vogue dans nos contrées encore au début du 18<sup>e</sup> siècle.

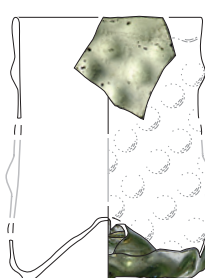
## Gobelet

Type 1



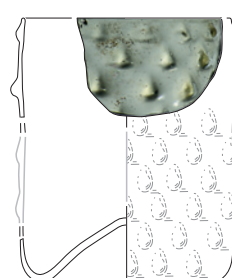
cylindrique  
paroi spiralée

Type 2.1



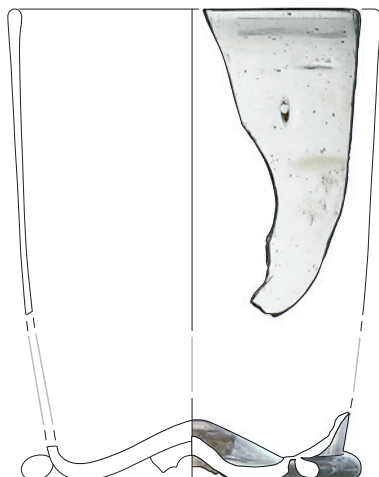
cylindrique  
paroi à gouttes circulaires

Type 2.2



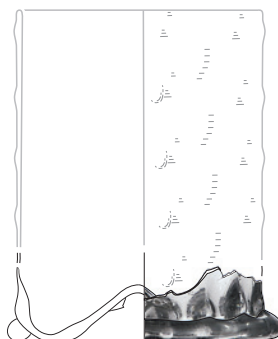
cylindrique  
paroi à gouttes en forme de larmes

Type 3.1



cylindrique, à cordon rapporté à la base  
paroi lisse

Type 3.2



cylindrique, à cordon rapporté à la base  
paroi à gouttes en forme de larmes

Type 4



tronconique  
paroi lisse

Fig. 57 : Court, Pâturage de l'Envers. Tableau figurant les principaux types de gobelets attestés sur le site. Ech. 1:2.

## Verre à pied

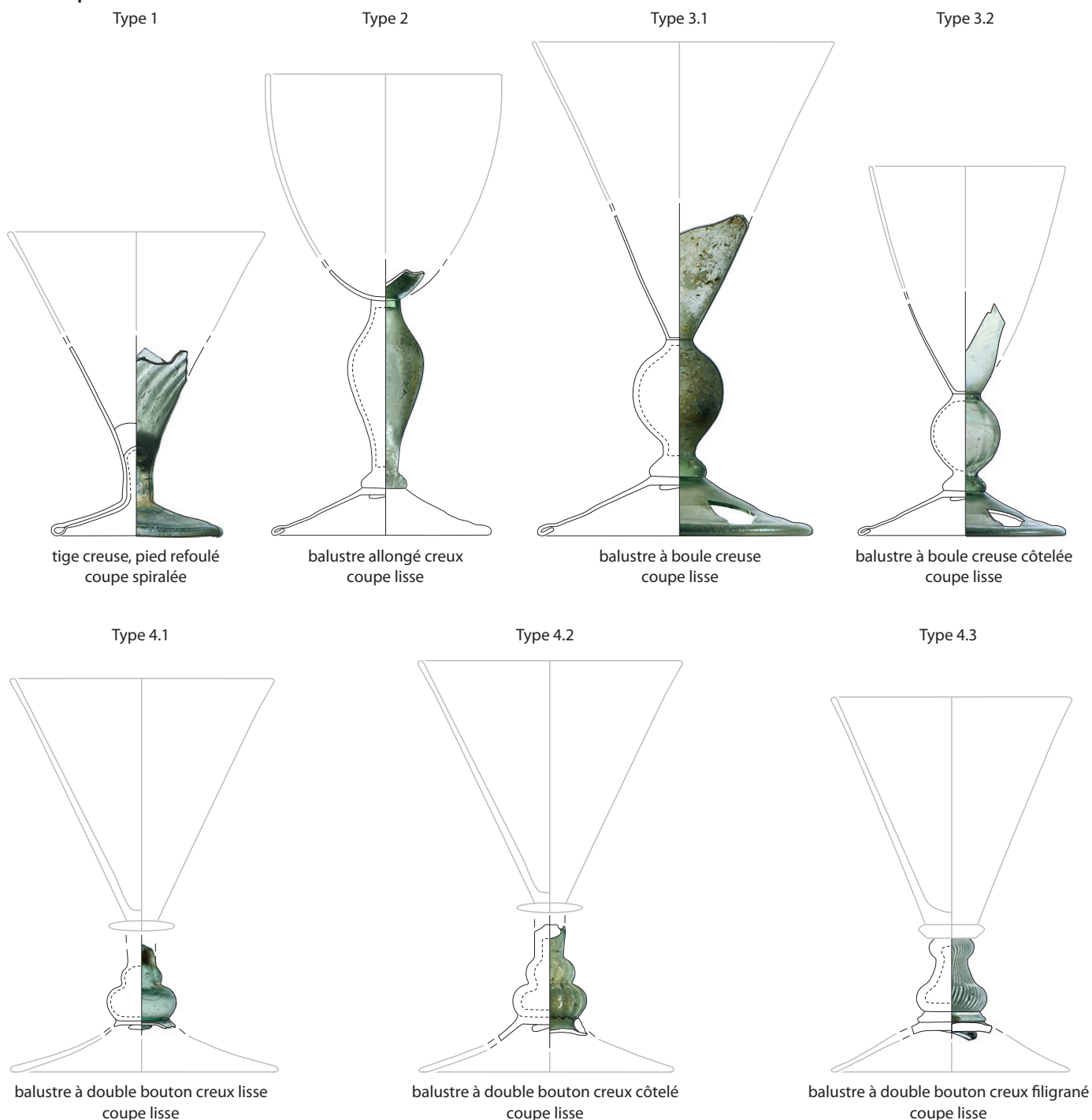


Fig. 58 : Court, Pâturage de l'Envers. Tableau figurant les principaux types de verres à pied attestés sur le site. A l'exception du type 1, le pied présente un bord rabattu ou, à l'instar des productions incolores, un pied lisse. Ech. 1:2.

Les exemplaires attribuables aux deux autres sous-groupes (plus de 500 individus identifiés), fournissent une plus grande diversité qui se manifeste surtout dans la forme de la jambe. Ainsi trouve-t-on des jambes creuses à bouton simple ou double, lisse ou côtelé, de couleur verte et incolore, mais aussi des jambes à double-bouton et pied filigrané (fig. 58). Les jambes sont réalisées par soufflage ou soufflage-moulage, puis retravaillées à la pince.

Les verres à jambe, pièces plus complexes à réaliser, nécessitent trois paraisons successives. La grande majorité des jambes sont creuses et les rares exemplaires pleins pourraient se rapporter à des ratés de fabrication. Ces verres sont principalement réalisés en qualité ordinaire, mais ils existent aussi en verre incolore. Plusieurs exemplaires à coupe incolore



présentent une jambe et un pied en verre filigrané. Ceux-ci étaient réalisés sur place, comme en témoignent les déchets de production et les nombreuses baguettes blanches retrouvées lors des fouilles. Quant aux verres à tige pleine, ceux-ci apparaissent moins nombreux, puisqu'ils ne rassemblent qu'une bonne dizaine d'individus.

### 3.4.2.3 Données quantitatives et répartition spatiale

Les analyses quantitatives du présent volume se rapportent au dénombrement général des tessons, sans aucune distinction de forme ou de catégorie. Conscients de la portée limitée de cette analyse, nous réservons au volume 4 le catalogue des verres, ainsi que l'analyse typologique et le traitement statistique des formes représentées sur le site.

Les bords, parois et fonds forment un groupe de 8631 tessons (fig. 60). Les bords et les fonds ont été collectés de façon systématique<sup>193</sup>, au contraire des parois qui ont fait l'objet d'un tri sur place dès la seconde campagne de fouille. Sans surprise, ce sont là aussi les mêmes zones de la halle de production qui fournissent l'essentiel des trouvailles. Un tiers des objets soufflés proviennent des zones 4.3 et 5, que l'on tienne compte ou non des parois. Les zones 1 à 13, soit la halle et ses abords immédiats, livrent 74,8 % des bords, parois et fonds collectés, alors que les habitations 2 et 3 y contribuent, fait remarquable tout de même, pour respectivement 5,0 et 9,4 %. Si l'on écarte le bâtiment 4, dont l'inventaire mobilier se rattache principalement à son exploitation postérieure en tant que ferme (dès 1714 ? jusque vers 1850), et si l'on fait abstraction du verre de couleur verte nettement dominant, on remarque certaines variations dans l'occurrence des teintes d'une habitation à l'autre (fig. 59). Le taux de représentation de chacune des teintes a été calculé individuellement pour chaque habitation, ce qui permet une certaine pondération, puisque le nombre de tessons récoltés dans chaque entité varie fortement, du simple au quintuple. Nous restons conscients qu'un petit nombre de tessons est statistiquement moins fiable qu'un ensemble plus fourni.

De façon générale, les tessons de bords, fonds et parois de couleur verte dominant lar-

#### Verres soufflés finis

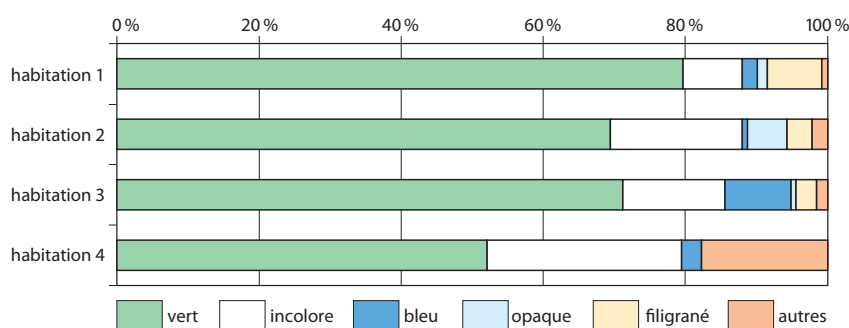


Fig. 59 : Court, Pâturage de l'Envers. Taux d'occurrence des couleurs au sein des verres soufflés finis (hors vitrage) retrouvés dans les quatre habitations (cumul des bords, parois et fonds).

gement avec une proportion située entre 68 et 80 %, ce qui correspond également à la distribution observée au sein du secteur A. Quelques variations entre habitations méritent néanmoins notre attention : l'habitation 2 révèle une proportion de verre vert inférieure aux habitations 2 et 3. L'habitation 4 doit être observée avec réserve : son corpus mobilier trahit une datation plus récente attribuable à une réutilisation du bâtiment, voire à une édification postérieure au passage des verriers. Le corpus de l'habitation 1 se distingue avec 8 % de verre filigrané, une proportion plus importante que celle comptabilisée dans les habitations 2 et 3. Par contre, l'incolore y est en retrait en comparaison des deux mêmes habitations. Rappelons que l'incolore et le filigrané peuvent être intimement liés, par exemple dans le cas de certains verres à jambe, dont le pied et la jambe sont réalisés en verre filigrané, alors que la coupe est incolore. Les déchets de production ont montré que ce type de verre dit *vetro a fili* a été produit sur place. De facture complexe, ce genre de produit réalisé à partir de trois paraisons devait être d'un certain prix. Toutefois, la qualité n'était pas à même de rivaliser avec celle des productions vénitiennes ou des imitations manufacturées aux Pays-Bas dès le 16<sup>e</sup> siècle<sup>194</sup>. Eu égard à la modestie du corpus de l'habitation 1, qui ne regroupe que 143 tessons, une certaine prudence s'impose dans l'interprétation de la proportion de verre filigrané, ce d'autant que le reste du corpus matériel apparaît plutôt fruste.

La répartition des déchets de production au niveau de la halle avait révélé une certaine concentration de verre filigrané à la hauteur des estrades, avec une certaine prédominance du côté nord (chap. 3.3.2.1 et fig. 11). La répartition des tessons de bord, paroi et fond

193 Voir les critères de sélection au chapitre 3.2.

194 Voir par exemple Veeckman 2002, 79-93 ; Baart 2002, 161-169.



secteur	zone	vert				incolore				bleu			
		bord	paroi	fond	total	bord	paroi	fond	total	bord	paroi	fond	total
A	non stratifié	17	13	30	60	2	14	4	20	2	2	0	4
	1	70	26	87	183	13	17	13	43	1	3	1	5
	2	105	51	149	305	18	25	19	62	4	13	1	18
	3	67	36	84	187	6	10	10	26	0	17	0	17
	4.1	6	6	6	18	1	1	0	2	0	0	0	0
	4.2	43	37	188	268	1	0	4	5	0	1	0	1
	4.3	305	293	532	1130	30	29	35	94	0	39	4	43
	4.4	91	47	95	233	13	23	12	48	1	7	0	8
	5	369	161	559	1089	30	38	31	99	2	22	5	29
	6	52	50	110	212	7	31	16	54	0	3	2	5
	7	12	20	32	64	1	16	6	23	0	0	1	1
	8	95	106	163	364	19	55	32	106	1	6	3	10
	9	66	65	107	238	6	46	17	69	0	1	0	1
	10	80	90	110	280	19	72	29	120	0	4	0	4
C	habitation 2	87	88	122	297	13	38	29	80	1	1	1	3
	habitation 3	151	212	214	577	28	47	42	117	3	69	4	76
	surface 5	11	12	21	44	1	7	5	13	0	0	0	0
	surface 6	2	3	5	10	0	4	0	4	0	0	0	0
	surface 7	118	124	173	415	15	47	17	79	1	3	0	4
	surface 8	7	5	28	40	1	4	3	8	0	0	0	0
D	habitation 1	21	23	70	114	3	7	2	12	0	3	0	3
G	surface 1	3	1	2	6	0	2	0	2	0	0	0	0
	surface 2	3	4	3	10	0	1	1	2	0	0	0	0
	surface 3	0	1	3	4	0	0	2	2	0	5	1	6
	surface 4	1	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
H	surface 9	8	8	12	28	0	1	2	3	0	0	0	0
I	habitation 4	5	26	7	38	4	11	5	20	2	0	0	2
L	ch. 2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
M	ch. 3	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
N	ch. 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total général		1979	1691	3140	6810	241	606	354	1201	19	206	24	249

Fig. 60 : Court, Pâturage de l'Envers. Distribution des tessons de bords, parois et fonds selon la couleur, le secteur et la zone.

indique une tendance inverse, avec 15 tessons au sud (zone 4.3) contre 5 au nord (zone 4.4). Mais la tendance se renverse à nouveau en faveur de l'estrade nord, si l'on tient compte des zones d'épandages à l'ouest (zones 1 à 3 et 5). Ces résultats montrent à quel point il serait osé d'en tirer des conclusions définitives.

De son côté, l'habitation 2 se distingue par une présence marquée de verre opaque (6 % du corpus), soit nettement plus que les autres maisons qui n'atteignent que 1 %. La production de verre opaque (voir chap. 3.3.2.1) n'est pas attestée au Pâturage de l'Envers, alors qu'elle l'est dans la verrerie précédente de Sous les Roches. Ce petit ensemble de tessons opaques se rapportent donc plutôt à des objets exogènes au site. Enfin, l'habitation 3 livre un remar-

quable corpus de tessons bleus (9 %), qui dépasse largement celui des habitations 1 et 2.

De façon plus générale, on constate qu'un quart à un tiers du corpus des bords-parois-fonds retrouvés dans le secteur des habitations n'est pas vert. Cela peut s'expliquer par la spécificité même de l'espace-habitat par rapport à l'espace-production : la gobeletterie y est mieux représentée que dans l'atelier même, car elle occupe une place choisie dans le vaisselier domestique.

### 3.4.3 Conclusion

L'étude systématique des tessons de verre, mais aussi des déchets de production, livre un certain nombre d'enseignements qu'il nous paraît

opaque bord	paroi	fond	total	filigrané bord	paroi	fond	total	autres bord	paroi	fond	total	somme totale	zone
0	0	0	0	0	1	3	4	0	0	0	0	88	non stratifié
0	1	2	3	0	0	9	9	0	0	0	0	243	1
0	2	0	2	0	0	8	8	2	2	2	6	401	2
0	0	0	0	0	1	7	8	0	1	1	2	240	3
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	22	4.1
0	0	0	0	0	0	2	2	0	1	0	1	277	4.2
0	3	0	3	4	0	11	15	2	2	1	5	1290	4.3
0	1	0	1	0	0	5	5	0	4	1	5	300	4.4
0	1	0	1	0	0	5	5	3	3	0	6	1229	5
0	2	1	3	0	1	11	12	1	0	0	1	287	6
0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	2	2	92	7
3	6	1	10	0	2	10	12	0	2	2	4	506	8
0	0	0	0	2	1	6	9	1	0	2	3	320	9
1	5	0	6	1	5	12	18	1	1	2	4	432	10
0	3	0	3	0	0	0	0	0	2	1	3	281	11
0	1	1	2	0	0	14	14	1	4	5	10	246	12
1	0	1	2	0	1	5	6	0	2	0	2	202	13
6	14	4	24	0	1	14	15	0	8	1	9	428	habitation 2
0	4	2	6	1	3	19	23	1	8	3	12	811	habitation 3
0	0	0	0	0	1	2	3	1	0	2	3	63	surface 5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	surface 6
1	0	0	1	0	0	7	7	1	3	4	8	514	surface 7
0	0	0	0	0	0	1	1	0	3	0	3	52	surface 8
0	2	0	2	1	1	9	11	0	0	1	1	143	habitation 1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	surface 1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	surface 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	13	surface 3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	surface 4
2	4	0	6	0	0	1	1	0	0	0	0	38	surface 9
0	0	0	0	0	0	0	0	3	8	2	13	73	habitation 4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	ch. 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	ch. 3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ch. 5
14	49	12	75	9	19	163	191	17	55	33	105	8631	total général

important de rappeler. Les quantités de verre rejetées dans et surtout autour de la halle révèlent d'emblée l'absence de toute collecte systématique des débris vitreux en vue d'une refonte. Dans l'optique du recyclage, tous les fragments ne présentent pas le même intérêt pour le verrier, puisqu'une sélection reste envisageable, par exemple en fonction des couleurs, dont le processus de fabrication exige davantage de soin et des matières premières peut-être onéreuses. Toutefois, il semble que le corpus n'ait pas subi de biaisement particulier, et l'approche statistique ne révèle pas de résultats disproportionnés ou incohérents. Si certaines verreries acquièrent du verre cassé pour le transformer en groisil, les artisans de Court n'ont pas eu recours à cette pratique : les quan-

tités de débris jonchant le site et les analyses chimiques, très homogènes dans leurs résultats, permettent même d'écarter cette idée. En conséquence, on peut en déduire que la matière première d'origine locale est abondante, aisée à exploiter et probablement d'un faible coût (voir chap. 2.1.1).

Au sein des déchets, les meules offrent la meilleure possibilité d'approche de la production, en particulier des couleurs. Comme elles présentent régulièrement des traces métalliques au niveau de la zone de contact avec la canne, elles sont systématiquement éliminées, car les oxydes métalliques apporteraient des impuretés indésirables qui teintent le verre.

La domination écrasante des débris de verre commun (teinte verte), qui représentent plus

de 86 % du corpus des déchets et des meules, montre à l'évidence que le site du Pâturage de l'Envers est versé dans une production de masse. Celle-ci est axée sur le vitrage (cives et manchons), les verres de pharmacie (bouteilles de toutes tailles) et la gobeletterie commune. Les verres de qualité supérieure, en verre incolore, y occupent une place plutôt marginale. Au niveau de la fabrication du verre plat, il convient de rappeler le caractère charnière du site qui, au début du 18<sup>e</sup> siècle, produit simultanément des cives et du verre au manchon, alors que le second supplantera totalement le vitrage rond dans les décennies qui suivront. En parallèle, on observe encore la confection de verres en calotte, un vitrage rond de taille plus grande, sans trace de pontil, apprécié des peintres sous verre. Cette production particulière, mal étudiée jusqu'ici en raison de son identification difficile, dut être assez courante aux 17<sup>e</sup>-18<sup>e</sup> siècles ; Tarcsay en a publié les premiers corpus archéologiques découverts en Autriche.

Quant aux formes soufflées, elles se déclinent principalement en contenants pharmaceu-

tiques ainsi qu'en gobeletterie fine destinée à la table. L'attestation d'une production locale de verres à la façon de Venise, en particulier de verres à jambe soufflée-moulée ou filigranée, constitue un élément important certes, mais sans doute pas tant que l'insertion chronologique très précise des pièces produites : 1699-1714. A ce titre, le site du Pâturage de l'Envers devient une référence de premier ordre.

### 3.4.4 Comparaison avec le site de Court, Sous les Roches

D'emblée il convient de préciser que la verrerie de Sous les Roches n'a pas fait l'objet d'une fouille archéologique. Fondé en 1674, cet atelier s'était vu attribuer, par le prince-évêque de Bâle, une forêt du droit associée à un bail d'exploitation de 25 ans. A son terme, une partie des maîtres-verriers souhaitant poursuivre leur activité dans la région déposèrent une requête pour un canton de forêt situé sur le versant opposé. Ils obtinrent le droit de l'exploiter durant 15 ans et s'installèrent *Rière Sairoche* : la verrerie du Pâturage de l'Envers était née.

#### décompte des fragments

catégorie	déchets de production						vitrage					
	déchets		meules		total		cives		carreaux/manchons		calottes	
couleur	PE	SLR	PE	SLR	PE	SLR	PE	SLR	PE	SLR	PE	SLR
vert	13761	10605	4364	782	18125	11387	7257	5920	388	301	50	93
incolore	1369	956	576	73	1945	1029	77	282	93	93	1070	1523
bleu	231	227	43	15	274	242	0	0	0	0	0	0
opaque	n. c.	21	n. c.	0	n. c.	21	0	0	0	0	0	0
filigrané	25	5	41	0	66	5	0	0	0	0	0	0
autres	89	28	16	0	105	28	0	0	144*	4	0	0
total	15475	11842	5040	870	20515	12712	7334	6202	625	398	1120	1616
% du total	75,4	93,2	24,6	6,8	100	100	80,8	75,3	6,9	4,8	12,3	19,6

#### pourcentage relatif

catégorie	déchets de production				vitrage			
	déchets		meules		cives		carreaux/manchons	
couleur	PE	SLR	PE	SLR	PE	SLR	PE	SLR
vert	88,9	89,6	86,6	89,9	99,0	95,2	62,1	75,6
incolore	8,8	8,1	11,4	8,4	1,0	4,5	14,9	23,4
bleu	1,5	1,9	0,9	1,7	0,0	0,3	0,0	0,0
opaque	n. c.	0,2	n. c.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
filigrané	0,2	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
autres	0,6	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	23,0*	1,0
total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	100,0	100,0

PE = Court, Pâturage de l'Envers  
SLR = Court, Sous les Roches

\*Dans cet ensemble figurent 122 fragments d'un vert-bleu très spécifique.

Nous devons aux fouilles personnelles, menées entre 1965 et 1979 par René Bassin<sup>195</sup>, le matériel archéologique de Sous les Roches dont nous disposons. Il n'y a pas lieu ici de faire l'étude complète de ce corpus d'un grand intérêt, mais plutôt d'en offrir un survol. Bien que le site verrier soit parfaitement localisé, nous ne disposons d'aucun document quant à l'emplacement des sondages opérés par Bassin. La présence de très nombreux micro-fragments (< 1 cm) suggère un prélèvement plutôt exhaustif, sans tri particulier. Le conditionnement soigné dans des enveloppes et des boîtes en carton dûment étiquetées, entreposées avec précaution, permet de rejeter toute idée de fragmentation secondaire. Cette même impression d'exhaustivité est partagée par Frey qui a parcouru le corpus céramique de ce complexe<sup>196</sup>. L'ensemble compte 52 385 fragments de verre totalisant 81,3 kg, ce qui est très proche du corpus prélevé, mais de manière plus sélective, sur le site du Pâturage de l'Envers (voir chap. 3.2).

L'éventail de production des deux ateliers est comparable : cives, verres au manchon

et en calotte, gobelets, verres à jambe à la façon de Venise, bouteilles... Le corpus a fait l'objet d'un classement selon les critères adoptés pour le Pâturage de l'Envers (mêmes catégories, mêmes couleurs de référence). L'évaluation statistique laisse entrevoir quelques différences intéressantes (fig. 61). De façon générale, le verre commun (vert) domine largement les complexes des deux sites et devance l'incolore dans des proportions assez proches. Dans la catégorie vitrage, la cive paraît moins représentée à Sous les Roches qu'au Pâturage de l'Envers (75,5 contre 80,8 %), tout comme le verre au manchon (4,8 contre 6,9 %). Néanmoins, la prudence reste de mise, car en chiffres réels, Sous les Roches livre 398 fragments de manchons issus de sondages, alors que 625 proviennent du site fouillé du Pâturage de l'Envers. Il semble donc que la production de manchons ait été importante sur ce site actif dans le dernier quart du 17<sup>e</sup> siècle. Par ailleurs, le verre en calotte s'avère aussi bien représenté à Sous les Roches, tant en terme de pourcentage que de fragments : il constitue près de 20 % du corpus de vitrage collecté par Bassin.

bord		verre soufflé		fond		total		catégorie
PE	SLR	PE	SLR	PE	SLR	PE	SLR	
1979	1833	1691	976	3140	2177	6810	4986	vert
241	243	606	229	354	250	1201	722	incolore
19	17	206	87	24	30	249	134	bleu
14	6	49	47	12	10	75	63	opaque
9	0	19	0	163	17	191	17	filigrané
17	1	55	3	33	0	105	4	autres
2279	2100	2626	1342	3726	2484	8631	5926	total
26,4	35,4	30,4	22,6	43,2	41,9	100	100	% du total

bord		verre soufflé		fond		catégorie
PE	SLR	PE	SLR	PE	SLR	
86,8	87,3	64,4	72,7	84,3	87,6	vert
10,6	11,6	23,1	17,1	9,5	10,1	incolore
0,8	0,8	7,8	6,5	0,6	1,2	bleu
0,6	0,3	1,9	3,5	0,3	0,4	opaque
0,4	0,0	0,7	0,0	4,4	0,7	filigrané
0,7	0,0	2,1	0,2	0,9	0,0	autres
100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	total

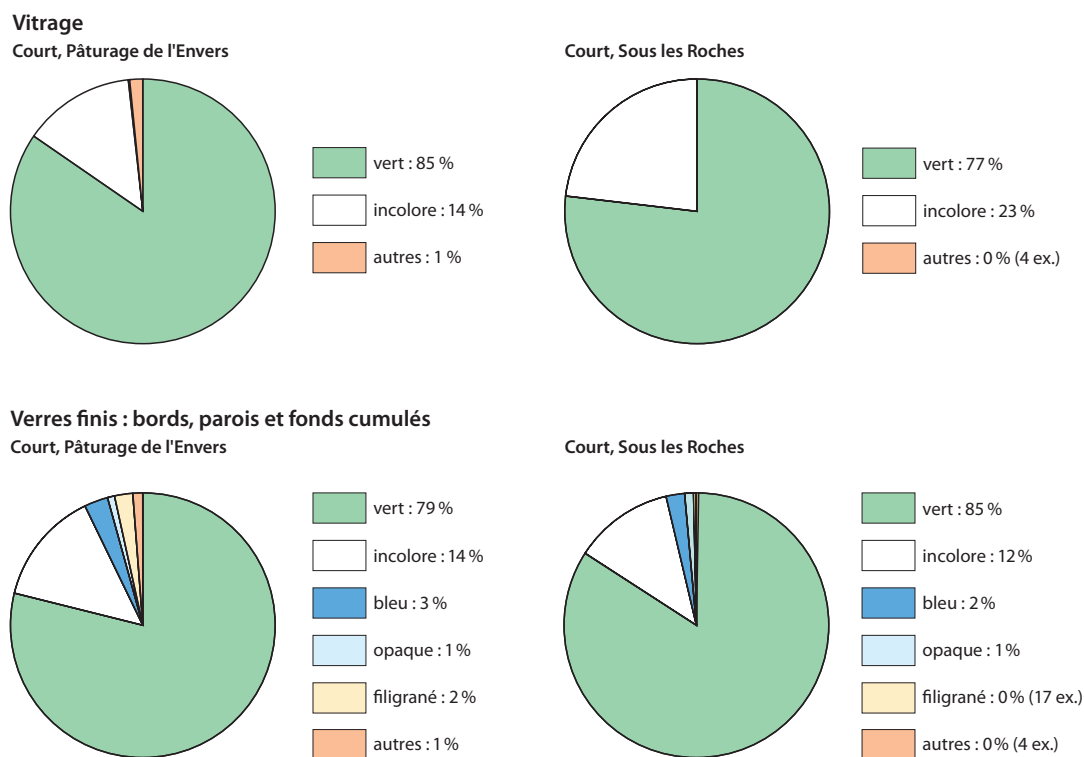
Fig. 61 : Comparaison des données statistiques de production obtenues sur les corpus des verreries de Court, Pâturage de l'Envers (1699-1714) et Court, Sous les Roches (1673-1699).

195 Habitant de Court passionné d'histoire ; voir Gerber 2010, 28, 34-35.

196 Communication orale du 10 août 2011. D'après la composition du corpus céramique, Frey estime que les sondages de Bassin ont touché la halle, le crassier et la zone d'habitat.



Fig. 62 : Confrontation des taux d'occurrence de couleurs au sein du vitrage et des verres finis (bords, parois, fonds) pour les sites Court, Pâturage de l'Envers (1699-1714) et de Court, Sous les Roches (1674-1699).



Concernant les décomptes de bords, parois et fonds des objets finis en verre soufflé, des différences intéressantes apparaissent : les tessons décolorés sont systématiquement mieux représentés à Sous les Roches, alors que la tendance s'inverse complètement pour le verre incolore (fig. 61-62). Une autre surprise provient des tessons bleus et opaques qui sont fortement représentés à Sous les Roches et comptent presque autant de fragments qu'au Pâturage de l'Envers, alors que le premier site n'a pas fait l'objet d'une fouille systématique. Par contre, à Sous les Roches, le verre filigrané semble plutôt discret avec 17 tessons de verre à jambe en balustre, dont la confection sur place est confortée par la présence de baguettes blanches.

Dans la catégorie des verres à boire, le site de Sous les Roches livre un spectre de gobelets à décor moulé, ornés de petites gouttes circulaires ou de gouttes allongées, tout à fait similaire à celui du Pâturage de l'Envers. On y trouve aussi des verres à pied refoulé et différents modèles de verres à jambe soufflée-moulée exécutée à la façon de Venise. Les différences entre Sous les Roches et le Pâturage de l'Envers apparaissent surtout dans ce dernier groupe, plus particulièrement dans la typologie des jambes<sup>197</sup>. A cet égard, les sites ver-

riers du Chaluet, tous parfaitement datés par des données d'archives, offrent une opportunité exceptionnelle de préciser l'insertion typochronologique de ces productions dans l'espace jurassien. Malheureusement pour les verreries 1 et 4<sup>198</sup>, l'éventail des productions reste mal connu faute de matériel suffisant. Hormis quelques objets conservés au Musée jurassien d'Art et d'Histoire de Delémont, les trouvailles qu'André Rais récolta sur la verrerie 1 en 1952 ne semblent pas conservées. De nouvelles fouilles seraient l'occasion d'une approche globale des productions à même de préciser, si ce n'est de remettre en cause, certaines chronologies en usage actuellement.

Les observations ci-dessus suggèrent une production de gobeletterie peut-être plus diversifiée, notamment en termes de couleurs, dans l'atelier de Sous les Roches, mais l'essentiel de l'effort reste consacré au verre commun, comme au Pâturage de l'Envers. La comparaison typologique des productions de ces deux sites devrait permettre de préciser l'évolution des formes et des décors, tant pour les gobelets que pour les verres à jambe, mais aussi d'affiner leur insertion chronologique. Le volume 4 consacre un chapitre comparatif aux produits de ces deux verreries courtoisanes successives.

197 Ce point est développé dans le volume 4.

198 Gerber 2010, 27-29 et 34-36.

### 3.5 Outils de fabrication du verre

Lara Tremblay

La fabrication du verre nécessite l'emploi d'une panoplie d'outils variés, adaptée en fonction du type de production. Si la canne à souffler s'impose à l'évocation de cette activité pour les époques médiévale et moderne, elle doit être encore accompagnée d'instruments divers permettant le façonnage de la paraison, de même que de ceux qui, en amont comme en aval, participent à la préparation du mélange, à sa fonte, à la recuisson des verres et à l'entretien des installations. Toutes ces opérations trouvent un écho dans le matériel mis au jour sur le site de la verrerie du Pâturage de l'Envers (fig. 63). Les fragments d'outils en métal associés au travail du verre qui y ont été découverts forment un ensemble substantiel : 671 individus ont pu être rattachés à cette catégorie, auxquels il faut encore vraisemblablement ajouter bon nombre des près de 150 éléments de couteaux retrouvés en contexte de production et des multiples tiges dont la fonction demeure indéterminée<sup>199</sup>.

L'identification des instruments spécifiques à la production du verre n'est toutefois pas sans poser de problèmes : les objets recueillis à l'issue des fouilles sont bien souvent informes, fortement fragmentés et enrobés par le produit de leur corrosion. Sans un nettoyage tout au moins superficiel de ces derniers, ce qui n'est souvent pas le cas, les indices parfois subtils permettant de les associer aux différentes activités de production disparaissent sous les concrétions. La récolte particulièrement abondante d'outils sur le site de Court tient sans doute en grande partie au traitement global du matériel métallique en conservation-restauration avant d'en entamer l'analyse. Barres et tiges ont ainsi pu retrouver partiellement leur identité de canne, pontil, pince ou pilot. L'identification de ces outils passant invariablement par la comparaison, les principales sources matérielles, écrites et iconographiques susceptibles d'y participer seront ici sommairement exposées. Il sera également tenté de voir dans quelle mesure la produc-



tion des différents types de verre à Court et la chaîne opératoire qu'elle implique sont perceptibles au travers des outils retrouvés ou de ceux dont l'absence se fait remarquer.

#### 3.5.1 Etat de la question

Les sources matérielles, écrites et iconographiques susceptibles de fournir des éléments de comparaison dans l'identification des fragments d'outils employés pour la fabrication du verre soufflé au début du 18<sup>e</sup> siècle sont nombreuses et diversifiées. D'autant plus que le répertoire de ceux employés semble, à première

Fig. 63 : Court, Pâturage de l'Envers. Sélection d'outils verriers parmi les mieux conservés. 1 palette, 2 marbre, 3 pince, 4 ciseaux, 5-7 fragments de cannes, 8 crochet, 9 pilot et 10 plateau de balance. Ech. 1:3.

199 Le catalogue de ces outils et son commentaire détaillé seront présentés avec l'ensemble du mobilier métallique dans le volume 4 de la série Court, Pâturage de l'Envers.

vue, avoir relativement peu changé de l'époque médiévale – voire de l'Antiquité – jusqu'à nos jours. Si le constat de cette invariabilité est repris dans la plupart des synthèses décrivant l'outillage verrier<sup>200</sup>, encore faut-il le mettre à l'épreuve d'une comparaison fine des sources et le moduler en fonction de l'accroissement progressif de la production. La cohérence avec laquelle la technologie verrière voyage en Occident à partir de la fin du Moyen Âge, suivant les parcours de vie de verriers d'Italie en Angleterre et d'Allemagne jusqu'en Amérique, assure également certaines similitudes et permet des rapprochements archéologiques parfois surprenants, surmontant en partie les frontières géographiques.

### 3.5.1.1 Sources archéologiques

Si la fouille archéologique des sites verriers sur de vastes surfaces demeure rare (voir chap. 1.3), le traitement détaillé du matériel qui en est issu l'est d'autant plus. L'analyse typologique du verre mis au jour prime bien souvent sur celle des autres types de mobilier. Un corpus de comparaison constitué de 19 sites publiés pour lesquels des outils de travail du verre comparables à ceux de Court ont été retrouvés a néanmoins pu être constitué. Il s'étale sur une période allant du 13<sup>e</sup> au 19<sup>e</sup> siècle et sur un territoire incluant la Suisse, l'Allemagne, l'Autriche, la République Tchèque, la France, l'Italie et les États-Unis. Ont été retenus les sites de Flühli (CH), Rebeuvelier (CH), Glaswasen (DE), Hils bei Grünenplan (DE), Nasachtal (DE), Pockau (DE), Spessart (DE), Steimcke (DE), Titisee-Neustadt (DE), Reichenau (AT), Broumy (CZ), Cadrix (FR), Planier (FR), La Seube (FR), Pairu (FR), Peyremoutou (FR), Germagnana (IT), Monte Lecco (IT) et New Bremen (US)<sup>201</sup>.

Se limitant en général à quelques brèves mentions parfois assorties de figures, seules quatre entreprises de catalogage partiel se distinguent par l'exhaustivité de leur présentation de l'outillage verrier : il s'agit de celles des sites médiévaux de Glaswasen (DE)<sup>202</sup> et du Nasachtal (DE)<sup>203</sup>, de même que des verreries modernes de Reichenau (AT)<sup>204</sup> et de New Bremen (US)<sup>205</sup>. Bien qu'une sélection des outils mis au jour ait été opérée pour leur restauration, leur traitement et leur publication, elles

fournissent le bassin le plus riche en termes de comparaisons avec le matériel de la verrerie de Court. Si la prévalence des fragments de cannes à souffler y demeure la plus élevée, on remarque aussi une certaine diversité : fragments de pontils, pinces, marbres, ciseaux, tiges, moules, crochets, grésiers, râbles, pelles, marteaux, balances et couteaux y sont notamment mentionnés. L'image partielle de l'équipement verrier offerte par l'étude du matériel issu de ces sites témoigne des difficultés généralement posées par son interprétation et sa mise en relation concrète avec les activités de production.

Hormis les outils récoltés directement sur le terrain, les traces laissées en négatif par ces derniers sur les fragments de verre (fig. 24 et 64) sont également en mesure d'apporter quelques informations supplémentaires. À Court, des marques de pontil claires et mesurables, sous forme d'adhérences en relief ou en creux, ont été relevées sur 182 fragments. Elles ont été principalement identifiées sur des fonds de bouteilles, de gobelets ou de verres à pied. Huit pastilles de verre circulaires entières ayant servi à empontiller des pièces et portant des traces nettes de l'outil employé ont aussi été mises au jour ; leur diamètre extérieur varie de 19 à 40 mm.

Ces témoins permettent déjà de se faire une idée de la variabilité du diamètre des pontils, dont les traces mesurées vont de 7 à 16 mm. Représentés respectivement par 48 et 31 individus, les pontils de 7 et de 12 mm semblent les plus fréquemment utilisés à Court ; ceux de plus de 12 mm se font beaucoup plus rares, avec seulement treize individus. Si la majorité des traces, soit 161 d'entre elles, présentent un cercle régulier, dans 21 cas, il s'agit d'une empreinte ovale. Il pourrait tout aussi bien s'agir des traces d'une tige adoptant véritablement cette forme que du résultat d'un glissement du pontil lors de sa fixation.

De nombreuses meules ayant conservé la forme du mors des cannes à souffler témoignent également de la variabilité des dimensions de ces dernières (voir chap. 3.3.2.1). L'une d'entre elles (cont. 75221) présente un petit bourrelet de verre latéral témoignant éloquentement de l'utilisation d'une canne déjà usée, dont la suture devait être en partie ouverte en raison de son exposition répétée à la chaleur du verre en

200 Voir notamment Foy/Sennequier 1989, 89 ; Foy 1989, 170 ; Philippe 1998, 153 ; Kurzmann 2004, 174.

201 Voir Descœudres/Horat/Stöckli 1985 pour Flühli ; Bélet-Gonda/Évéquoz/Eramo 2007 pour Rebeuvelier ; Frommer/Kottmann 2004 pour Glaswasen ; Leiber 1990/91 pour Hils bei Grünenplan ; Lang 2001 pour le Nassachtal ; Černá 1995 pour Pockau ; Wamser 1984 et Baumgartner/Krueger 1988 pour le Spessart ; Stephan/Wedepohl/Hartmann 1993 pour Steimcke ; Maus/Jenisch 1998 pour Titisee-Neustadt ; Társcay 2009 pour Reichenau ; Žegklitz 2007 pour Broumy ; Foy 1989 pour Cadrix, Planier et La Seube ; Jannin 1990 pour Pairu ; Foy/Averous/Bourrel 1983 pour Peyremoutou ; Mendera 1991 pour Germagnana ; Fos-sati/Mannoni 1975 pour Monte Lecco ; Hume 1976 pour New Bremen.

202 Frommer/Kottmann 2004, 236-239 et Fundkatalog, 38-42, pl. 13-15.

203 Lang 2001, 88-93, 150-154 et 164-166, pl. 8-10.

204 Társcay 2009, 264-267 et pl. 205.

205 Hume 1976, 179-181 et 202-205, pl. 46-47.



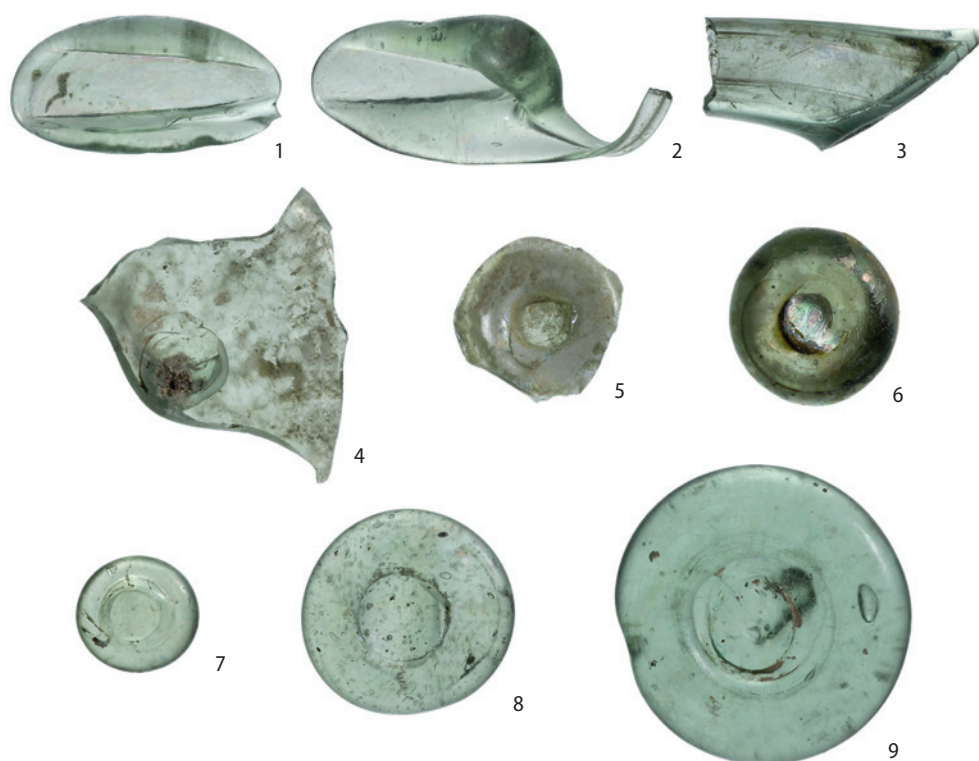


Fig. 64 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragments de verre avec traces d'outils. 1-2 traces de pinces, 3 trace de ciseau, 4-6 traces de ferrets ou pontils sur objets finis et 7-9 pastilles pour empon-tiller. Ech. 1:1.

fusion. Une trace nette de découpe au ciseau a été identifiée à l'extrémité d'un fragment de tube creux (cont. 78258-1) dont les bords sont refermés et légèrement aplatis. Quarante-deux fragments portent encore des traces de pinces; dans tous les cas relevés, il s'agit de pinces à pointe de section plate qui ont été utilisées pour saisir le verre par une pastille et l'étirer. Il demeure difficile d'associer le geste à une étape de fabrication précise, mais la mise en place d'anses pourrait peut-être ici lui correspondre. L'impression de l'outil témoigne ainsi non seulement de sa présence, mais peut aussi parfois révéler ses dimensions et suggérer le contexte de son utilisation.

### 3.5.1.2 Sources écrites et iconographiques

Outre les sources archéologiques, les textes décrivant les techniques de fabrication du verre et les illustrations qui souvent les accompagnent offrent également de précieuses informations. On retrouve déjà chez Théophile, dans le premier quart du 12<sup>e</sup> siècle, la mention des outils qu'il considère nécessaires au travail du verre : « un tube de fer de deux aunes, de la grosseur du pouce, deux tenailles de fer battu à l'une des extrémités, deux cuillers de fer, et autres

instruments de fer et de bois à votre convenance »<sup>206</sup>. Si quelques manuscrits médiévaux illustrent encore le travail de verriers munis de cannes près du four<sup>207</sup>, il faut attendre le milieu du 16<sup>e</sup> siècle pour que la variété des outils utilisés au cours du processus de fabrication soit traduite en image dans le *De re metallica* d'Agricola (fig. 65). Cannes, marbres, pinces et moules y trouvent dès lors leur place sur une illustration<sup>208</sup>.

Ce n'est toutefois pas avant la seconde moitié du 17<sup>e</sup> siècle que se crée une véritable prose descriptive assortie de planches spécifiquement dévolues à l'outillage verrier. Ouvrage précurseur tenant davantage du livre de recettes destiné aux initiés que du traité technique, *L'Arte vetraria* d'Antonio Neri<sup>209</sup>, publié à Florence en 1612 sans illustration, contient bien peu d'informations concrètes sur les techniques de soufflage du verre. C'est néanmoins grâce à sa diffusion et aux multiples traductions dont il a fait l'objet, enrichies subséquemment par leurs auteurs respectifs, que la composition de l'outillage verrier se précise dans les sources. Les additions substantielles au texte proposées par Christopher Merrett dans sa traduction anglaise de 1662, notamment son chapitre sur les fours accompagné d'une description des principales étapes de fabrication du

206 Théophile c.1125/1843, 82.

207 Charleston 1978, 11-14.

208 Agricola 1556/1992, 479.

209 Neri 1612/1980.



Fig. 65 : Planche figurant un four accompagné d'outils, tirée du *De re metallica* d'Agricola 1556/1992, 479. A les cannes, B fenêtres, C avec les plaques de marbre, D pinces et E moules.



verre<sup>210</sup>, remettent en contexte l'usage des outils. Il y joint encore une description systématique d'une vingtaine de ces derniers en appendice, sous forme de liste<sup>211</sup> : barres droites ou courbées, pelles, râbles, cuillères, fourches, ferrets, pinces, cannes, pontils, ciseaux, tranche-col, crochet et moules y sont évoqués. La traduction visuelle autant que française des outils désignés sous les noms de *padel*, *procers*, *strocals*, *fascets*, *cassia stake* et *cranny* demeure toutefois incertaine.

Dans sa traduction latine de l'ouvrage de Neri et des additions de Merrett en 1668, Andreas Frisius ne se contente pas de reprendre à la lettre cette liste. Il y ajoute encore deux planches (fig. 66), en plus de celle d'Agricola précédemment mentionnée et à peine modifiée. Toutes deux sont assorties d'une légende descriptive : l'une illustre spécifiquement la panoplie des outils du verrier et l'autre en met quelques-uns en contexte près du four. Seize outils différents, dont les noms rappellent parfois la forte influence de la tradition verrière italienne, y sont ainsi représentés : marbre, canne, pontil, ferret, râble, cuillères et pelles de grande ou petite taille, creusets, ciseaux,

écumoire, pince, pince à fleur, pince à pointe, canne, de même qu'un instrument spécifique à la fabrication des urinaux<sup>212</sup>. Il s'agit là des toutes premières illustrations du genre, spécifiquement dévolues à l'outillage<sup>213</sup>. Elles seront fidèlement reprises et accompagnées de leur description dans les traductions subséquentes de l'ouvrage de Neri, bien qu'avec quelques variations dans leur mise en scène. Elles figurent ainsi dans la traduction allemande de Johannes Kunckel en 1679, dans les traductions françaises de Haudicquer de Blancourt en 1697 et du baron d'Holbach en 1752.

Pour toute modification des illustrations de Frisius, Kunckel ne fait que transférer les pelles et cuillères de la première à la seconde figure. On note également la transposition de ces outils dans un décor plus réaliste, la suspension de certains à des crochets rappelant le cadre d'un atelier de verrier<sup>214</sup>. A la toute fin du 17<sup>e</sup> siècle, Haudicquer de Blancourt choisit plutôt de regrouper l'ensemble des outils sur une même planche, où l'on retrouve pour la première fois un pontil clairement individualisé ; il y ajoute encore l'illustration d'un crochet et celle d'une fourche. Leur mise en scène près du four est assurée par la reprise de l'illustration d'Agricola, le costume des personnages étant tout au plus remis au goût du jour<sup>215</sup>. Quant à l'ouvrage du baron d'Holbach, bien que de nouvelles planches techniques des installations y soient ajoutées, il reprend essentiellement les illustrations proposées par Kunckel. Il déplace seulement la canne d'une figure à l'autre et revient à un décor plus abstrait, rappelant celui de Frisius. Sa traduction de la liste des outils mentionnés par Merrett a toutefois le mérite de préciser ceux qui ne sont apparemment plus en usage au milieu du 18<sup>e</sup> siècle, tels les *procers* et *fascets*<sup>216</sup>.

Sur deux siècles, du milieu du 16<sup>e</sup> au milieu du 18<sup>e</sup>, la description et l'illustration des outils de travail du verre semblent ainsi figées dans une tradition moderne héritière de celle du Moyen Âge, caractérisée par sa redondance. On ne peut ainsi exclure que ces sources, reprenant systématiquement le contenu d'ouvrages plus anciens, soient potentiellement détachées de la pratique et de son évolution, masquant peut-être la transformation de certains usages. Il faut attendre le troisième tiers du 18<sup>e</sup> siècle et l'œuvre des encyclopédistes

210 Cette description demeure toutefois fortement inspirée par celle d'Agricola ; voir Merrett 1662/2006, 297-307.

211 Merrett 1662/2006, 421-423.

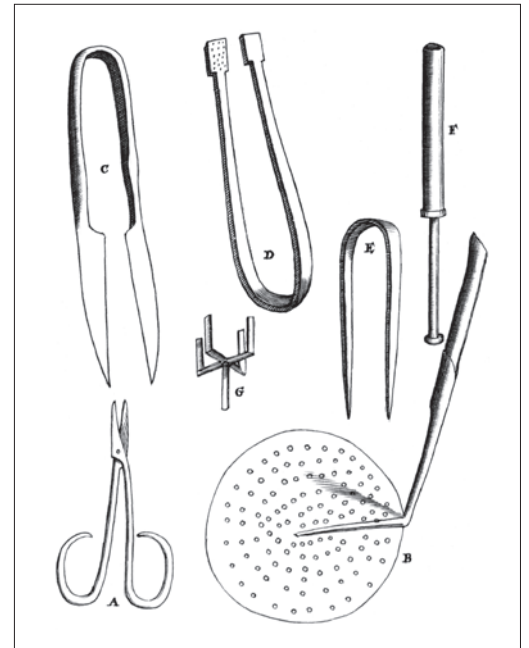
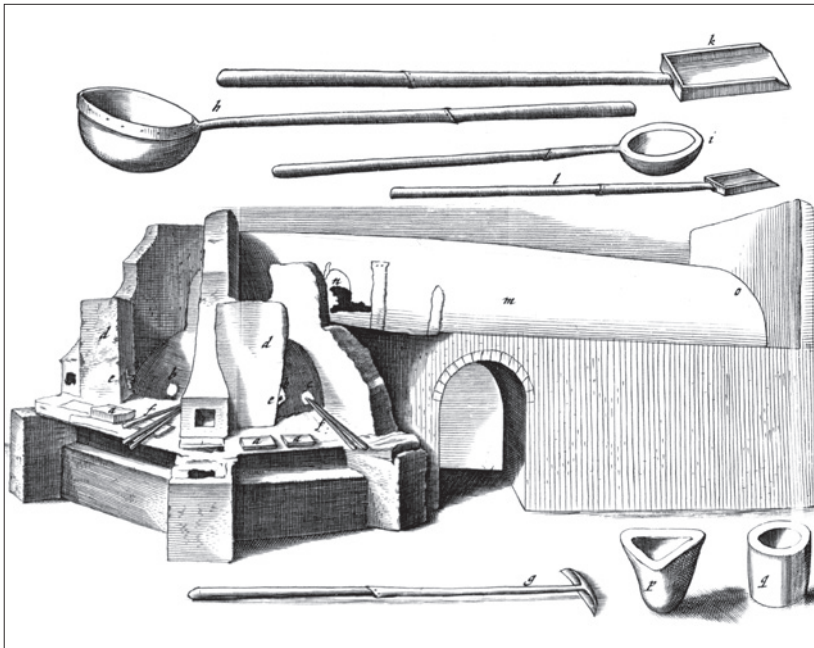
212 Frisius 1668, 449-450.

213 Turner 1962, 31.

214 Kunckel 1679/1975a, pl. S et R.

215 Haudicquer de Blancourt 1697/1718, 47-50.

216 Holbach 1752, lli-iv et pl. 4.



pour noter un renouvellement sensible sur le thème de l'outillage verrier, tant dans le discours que dans son illustration. En 1765, la parution de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert apporte non seulement une contribution originale par son texte, collant au plus près aux détails techniques de la production dans toutes ses étapes et décrivant l'ensemble des instruments mis en œuvre<sup>217</sup>, mais aussi par un riche ensemble d'illustrations des outils et des gestes posés dans leur contexte par les verriers de cette époque (fig. 67). L'*Encyclopédie méthodique* de Panckoucke, publiée en 1791, présente des planches bien élémentaires comparées à celles fournies par Diderot et d'Alembert, mais ses textes se caractérisent par une précision encore plus grande dans la description du geste posé outil en main<sup>218</sup>. La tradition allemande n'est pas en reste, avec la description des instruments verriers et leur illustration offertes en 1779 par Johann Georg Krünitz dans l'*Oeconomische Encyclopädie*<sup>219</sup>.

L'augmentation substantielle du nombre des outils illustrés dans ces ouvrages, ciblant plus particulièrement ceux de grande taille et sans doute liée à l'accroissement de la production, y est tout aussi tangible que la disparition de certains. C'est notamment le cas de la fameuse cuillère percée de trous (écumoire) servant à tirer le sel alcalin des chaudières<sup>220</sup>, ostentatoirement représentée dans toutes les traductions de l'ouvrage de Neri/

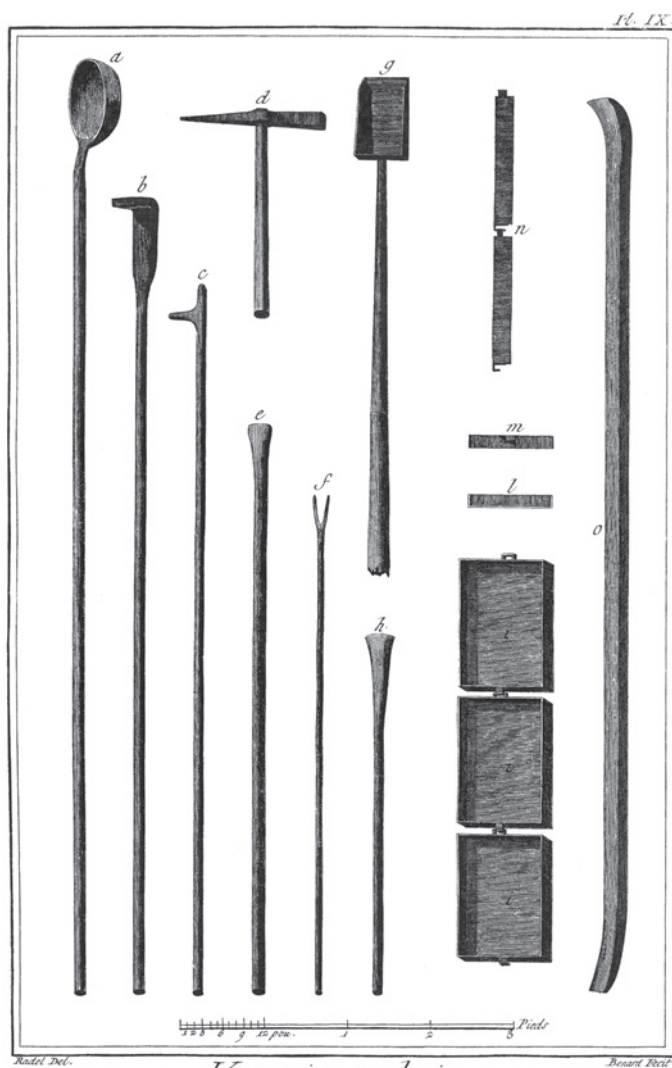
Merrett. Certaines techniques évoluent peut-être, le filtrage des sels pouvant ainsi remplacer le puisage, mais le recours à des sources d'approvisionnement extérieures peut également dispenser de certaines opérations qui nécessiteraient l'usage d'instruments spécifiques (voir chap. 2.1.2). Cette augmentation du nombre des outils illustrés ne semble toutefois pas représentative d'une diversification radicale du répertoire, l'outillage de base nécessaire dans l'application des techniques de fabrication du verre soufflé demeurant sensiblement le même. Ainsi, bien que plus tardives que notre site, les sources issues de la seconde moitié du 18<sup>e</sup> siècle, dont le contenu est encore souvent repris par celles associées à la tradition des manuels verriers au 19<sup>e</sup> siècle<sup>221</sup>, sont porteuses d'informations détaillées sur un outillage souvent encore ou déjà utilisé dans le soufflage du verre à l'époque de l'exploitation de la verrerie du Pâturage de l'Envers.

### 3.5.2 Production et chaîne opératoire

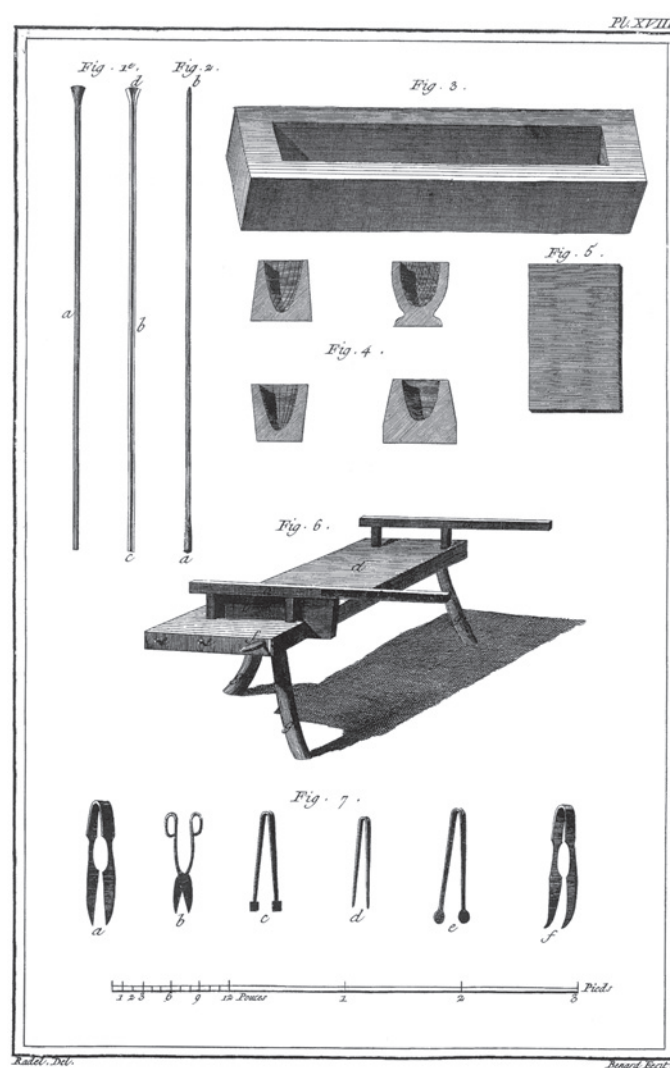
La production sur le site de la verrerie du Pâturage de l'Envers implique invariablement le soufflage du verre au moyen d'une canne, qu'il s'agisse de gobeletterie ou de vitrage réalisé sous forme de cives et de manchons. Le matériel recueilli s'en fait le témoin : des 671 fragments

Fig. 66 : Premières planches spécifiquement dévolues aux outils verriers, tirées de Frisius 1668, 449 et 450. A gauche, a marbre, f tiges de fer, g râble, h-i cuillères, k-l pelles, p-q creusets ; à droite, A ciseaux, B écumoire, C pince simple, D pince à motif, E pince à pointe, F canne, G instrument dit « à urinaux », ou sabot à bouteilles.

- 217 Diderot/D'Alembert 1765c, notamment 108-113 ; Diderot/D'Alembert 1772/2002, pl. *Verrerie en bois*.
- 218 Allut 1791, notamment 447-448 et pl. 5.
- 219 Krünitz 1779, 612-613 et fig. 974-978.
- 220 Frisius 1668, 451 ; Kunckel 1679/1975a, 306 ; Haudicquer de Blancourt 1697/1718, 49 ; Holbach 1752, liij.
- 221 Tabor 1818 ; Bastenaire-Daudenart 1825 ; Fontenelle/Malepeyre 1854 ; Peligot 1862 ; Bontemps 1868.



*Verrerie en bois,  
Différents Outils employés dans les petites Verreries à pivotte.*



*Verrerie en bois, Différents Outils pour le travail du Ferre.*

Fig. 67 : Deux planches de l'*Encyclopédie* illustrant les outils verriers, d'après Diderot/D'Alembert 1772/2002, *Verrerie en bois*, première section. A gauche, pl. IX : a cuillère, b râble, c crochet, d pioche, e grand pilot, f fourchette, g pelle, h petit pilot, i-n ferrasses, o grandes pinces et à droite, pl. XVIII : 1 canne, 2 pontil, 3 auge à recoupes, 4 moules, 5 marbre, 6 banc, 7 pinces.

d'outils mis au jour, 552 appartiennent à des cannes à souffler dont l'usure est marquée. La variété avec laquelle se présentent les 119 fragments d'autres outils donne encore un aperçu de quelques étapes de la chaîne opératoire de fabrication.

### 3.5.2.1 Préparation et fonte du mélange

De la préparation du mélange de verre, on peut retenir la présence d'un petit plateau de balance dans la halle de production, qui a vraisemblablement servi à peser des substances entrant dans sa composition. D'un diamètre de 64 mm, sa petite taille permet d'envisager son emploi en relation avec des ingrédients utilisés en faible quantité, notamment ceux permettant de colorer le verre (voir chap. 2.1.5). Ceux-ci ont peut-être été manipulés à l'aide de

petites spatules dont deux exemplaires ont également été retrouvés. La fonte du verre à Court s'effectue directement dans des creusets de céramique (voir chap. 2.2.1), que l'on devait déplacer au moyen de grandes barres de fer aux extrémités en coin servant de levier. Deux de ces barres ont été mises au jour, dont une entière d'une longueur de 1,25 m. La fusion nécessite également un brassage périodique de la matière : c'est à cette fin qu'ont dû servir les neufs fragments de tiges de fer dont l'extrémité est globulaire, appelées pilot en référence à l'*Encyclopédie* et pouvant aussi potentiellement servir à piler le groisil<sup>222</sup>. Leurs déformations, de même que les résidus vitreux et blanchâtres qui les recouvrent, témoignent de leur passage dans le verre. Quatre tiges recourbées présentent également des altérations de formes dues à la chaleur et des traces de résidus vi-

<sup>222</sup> Diderot/D'Alembert 1772/2002, *Verrerie en bois*, première section, pl. IX, fig. e et h.



treux ; il semble s'agir de crochets qui ont peut-être aussi été employés pour écrémer la surface du verre en fusion.

### 3.5.2.2 Soufflage et façonnage

Hormis les 552 fragments de canne à souffler déjà mentionnés, c'est également à cette étape de la fabrication que sont à rattacher le plus grand nombre de fragments d'outils. Vingt sections de tiges pleines légères ou ferrets ont été mises au jour. Elles sont susceptibles d'appartenir à des pontils, particulièrement nécessaires en gobeletterie, à des cordelines permettant de former le goulot des bouteilles ou à des fers à fendre, qui permettent d'ouvrir les manchons. Cinq fragments de lames de ciseaux ou de forces rappellent leur importance dans le découpage du bord des verres à boire et des pièces rapportées<sup>223</sup>. Trente-cinq fragments de branches de pinces de tailles et de formes variées ont également été retrouvés. Ces dernières sont indispensables dans le façonnage des bouteilles et de la gobeletterie, notamment pour définir la forme des jambes des verres à pied. Un fragment cylindrique creux en fonte d'à peine 27 mm de diamètre intérieur, appartenant potentiellement à un moule, pourrait avoir servi dans la fabrication des nombreuses petites bouteilles de pharmacie retrouvées sur le site. Le diamètre particulièrement petit d'une douzaine de mors, dont le trou mesure tout au plus 10 mm, semble également s'accorder avec ce type de production. Un cône d'argile d'un diamètre maximal de 60 mm à la base, portant des traces de chauffe, a peut-être été employé pour refouler le cul des bouteilles (fig. 68 et pl. 12,60). Une palette pour aplatir la paraison, de même que deux marbres dont un pratiquement complet, sont également à mentionner parmi les trouvailles. Le corpus de Court se caractérise également par un nombre surprenant d'éléments de couteaux, près de 150, retrouvés pour la plupart en contexte de production, dans les secteurs de la halle et de l'étenderie. Ces fragments appartiennent le plus souvent à des couteaux de poche. Leur quantité et leur répartition spatiale suggèrent fortement une implication dans les activités de fabrication du verre, au sein desquelles ils pouvaient potentiellement assumer plusieurs fonctions (voir vol. 4).



Fig. 68 : Court, Pâturage de l'Envers. Cône de terre cuite ayant probablement servi à renfoncer le cul des grandes bouteilles (cat. 60). Ech. 1:1.

### 3.5.2.3 Des absences éloquentes

L'absence de fragments de certains outils dont on aurait pu s'attendre à retrouver des traces intrigue, tout en soulevant la délicate question de la représentativité du matériel archéologique récolté. Lors de l'abandon du site en 1714, les verriers ont sans doute laissé derrière eux le matériel dégradé qui ne pouvait plus être employé dans les activités de production. Outre peut-être quelques individus égarés, les outils en bon état ont donc vraisemblablement été transférés dans la verrerie subséquente, implantée à proximité<sup>224</sup>. Certaines étapes de la production semblent ainsi sous-représentées, peut-être en raison du nombre plus restreint d'outils qu'elles requéraient. Hormis les pots à recuire, aucune trace d'instruments ayant participé au processus de cuisson n'a été identifiée. On déplore notamment l'absence de fragments des quelques longues fourches hypothétiquement nécessaires pour porter les pots aux arches<sup>225</sup>, dont la présence aurait pu confirmer l'existence. Si l'on exclut les couteaux, qui ont peut-être servi à enlever les résidus de verre sur les cannes, et les nombreux fragments de tôle appartenant peut-être à des récipients, les activités d'entretien des outils, de chauffe et de nettoyage des installations ne sont pas non plus représentées. Il faut également mentionner l'absence systématique d'outils en bois sur le site, qu'il s'agisse de mailloche, d'extrémités

223 Diderot/D'Alembert 1765c, 109 ; Allut 1791, 488 ; Bontemps 1868, 565.

224 Voir Gerber 2010, 29.

225 Allut 1791, 490 et Frey (à paraître).



de pinces ou de moules. Dans ce cas, c'est manifestement le terrain qui n'a pas offert les conditions de conservation nécessaires à leur préservation.

Les outils de grande taille, représentés par à peine deux barres de fer, se font aussi plutôt rares malgré leur omniprésence sur les planches de l'*Encyclopédie*<sup>226</sup>. La solidité des râbles, pelles et autres barres de fer massives, dont seuls quelques fragments incomplets pourraient témoigner, leur assurait sans doute une durée de vie plus longue que celle d'une canne ou d'une pince, fortement éprouvées par leur contact direct avec le verre chaud. On peut également supposer que leur nombre était relativement moins élevé. Seule une bande de tôle recourbée dont l'interprétation demeure hasardeuse laisse envisager la présence de grandes cuillères appelées « poches »<sup>227</sup>, servant à transvider le verre et à l'écrémer. La fusion effectuée directement dans les creusets au Pâturage de l'Envers pourrait expliquer leur absence ; l'écramage pouvait également être réalisé avec d'autres types d'instruments, comme les crochets. Signalons au passage la versatilité apparente des instruments à long manche, qui peuvent également servir de levier, telles ces cuillères employées pour déplacer les creusets sur deux planches de l'*Encyclopédie*<sup>228</sup>. Quant à l'absence de grésoir, qui permet de découper le verre plat et témoigne habituellement de son travail<sup>229</sup>, elle demeure surprenante compte tenu de la production de vitrage

identifiée à la verrerie du Pâturage de l'Envers. Elle pourrait toutefois signifier que la taille du produit fini n'était pas réalisée sur place. Des encoches ont bien été observées sur quelques fragments découpés, mais il pourrait tout autant s'agir de verre appartenant aux fenêtres des bâtiments du site.

### 3.5.3 Conclusion

Si la richesse du corpus d'outils verriers du Pâturage de l'Envers est indéniable, avec ses 669 individus, il n'en présente pas moins un tableau fragmentaire de l'ensemble de l'outillage mis en œuvre dans le cadre de la production. Présences et absences semblent tributaires de la fragilité des outils et de leur usage répété, tout comme de la sélection pratiquée par les verriers lors de leur abandon du site. On ne peut qu'imaginer le nombre de ceux qui ont été emportés vers la verrerie de Vieille Couperie en 1714. La quantité importante de fragments laissés derrière eux tend toutefois à relativiser la valeur qu'ils accordent au métal, tout en démontrant la somme importante de déchets produits sur une période d'à peine quinze ans. L'éclairage particulier que peuvent fournir les sources de comparaison pour chacun des types d'outils de travail du verre retrouvés et leur étude détaillée accompagneront le catalogue global des objets métalliques dans le volume 4 de la série.

226 Diderot/D'Alembert 1772/2002, *Verrerie en bois, première section*, pl. IX-XV et *seconde section*, pl. VI.

227 Holbach 1752, liv ; Diderot/D'Alembert 1765c, 140-141 ; Allut 1791, 547.

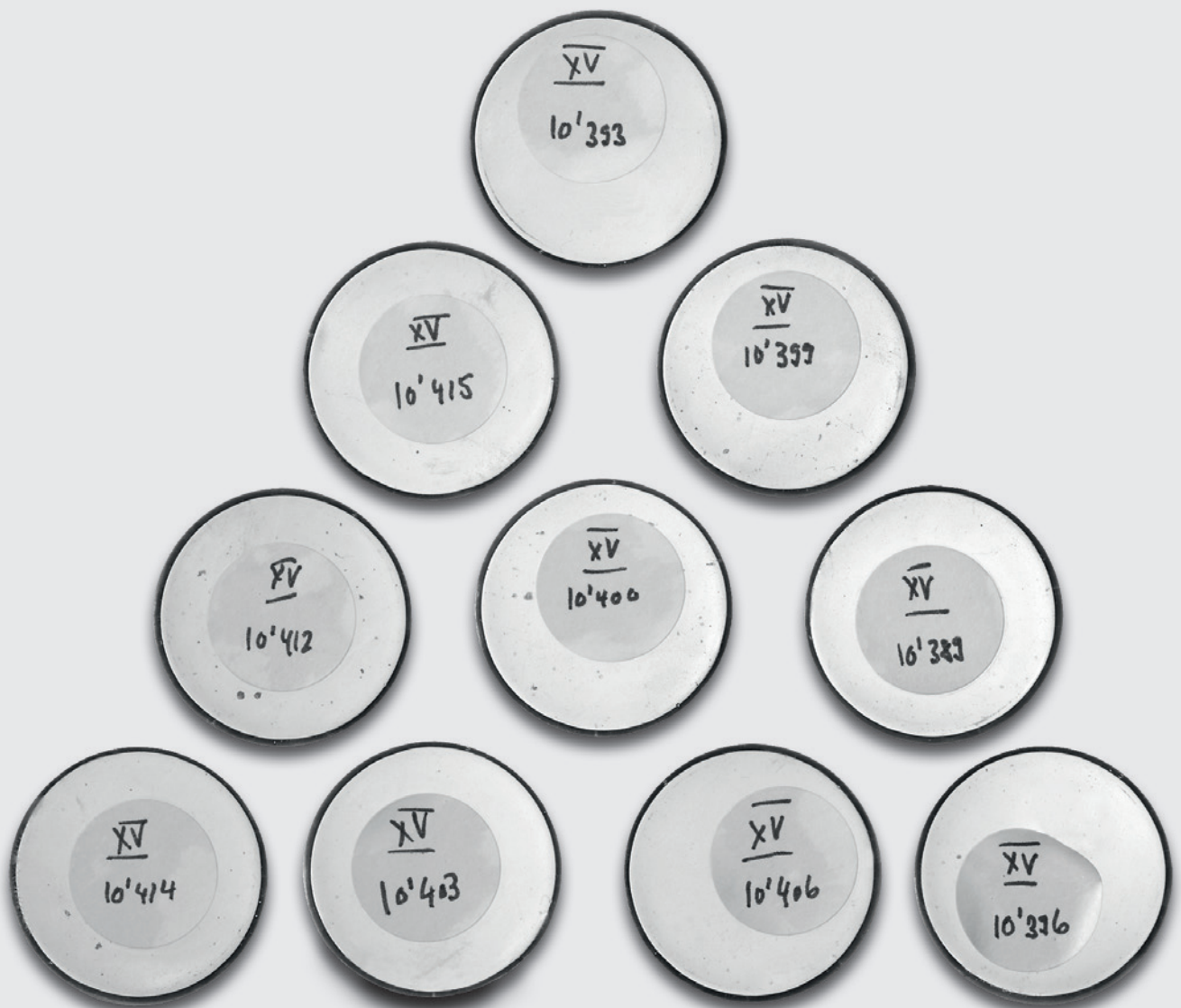
228 Diderot/D'Alembert 1772/2002, *Verrerie en bois, première section*, pl. X et *seconde section*, pl. XVII.

229 Voir Diderot/D'Alembert 1772/2002, *Vitrier*, pl. I, fig. 6 et quelques individus retrouvés lors de fouilles dans Lang 2001, 92 et 165, pl. 9 ; Kaufmann 2010, 432 et 433, pl. 68.



## 4. Archäometrische Analysen der Gläser

Yvonne Gerber (YG) und Willem B. Stern (WBS)



## 4.1 Waldglas allgemein

### 4.1.1 Einleitung

2001 gelangte der Archäologische Dienst des Kantons Bern (nachfolgend ADB genannt) an das Geochemische Labor des Mineralogisch-Petrographischen Instituts der Universität Basel mit der Anfrage, ob Glas, Glasrohstoffe und Materialien der Grabung Court, Pâturage de l'Envers in Basel analysiert werden könnten.

Die Anfrage kam zu einem schwierigen Zeitpunkt, denn im September 2000 war der Leiter des erwähnten Instituts tödlich verunglückt und seine Nachfolge – wie jene anderer, altershalber frei gewordener Stellen im Bereich Erdwissenschaften – nicht geregelt worden. Der Zweitautor (WBS) dieses Beitrags hatte als neuer, federführender Leiter des erwähnten Instituts administrative Verpflichtungen übernommen und die Betreuung von zusätzlichen Doktoranden wahrzunehmen, während ein kleiner werdender Kreis von Kollegen den Betrieb von Lehre und Forschung im Bereich Mineralogie-Petrographie aufrechtzuerhalten hatte. 2004 kam es dann zu einem formalen Ende des Bereichs Erdwissenschaften an der Universität Basel. Das desolate Arbeitsumfeld hat die wissenschaftliche Arbeit in den folgenden Jahren beeinträchtigt, weshalb einzelne Details des hier vorgestellten Projekts nicht in gewünschtem Umfang vervollständigt werden konnten. So hätten zum Beispiel aus der Gegend von Chaluet weitere Holzproben verascht und experimentell zu Glas verarbeitet werden sollen.

Andererseits versprach das Grabungsmaterial von Court, Pâturage de l'Envers neue Einsichten in die Technologie der Glasherstellung im Jura des beginnenden 18. Jahrhunderts. Es wäre schade gewesen, das interessante Material zu ignorieren. So kamen 2001 zunächst 236 Proben zur Analyse nach Basel (s. Abb. 72). Ein vorläufiger Bericht mit den Analyseergebnissen und ersten Auswertungen ging im Sommer 2002 an den ADB.<sup>230</sup>

Die Resultate zeigten unter anderem, dass einzelne Materialgruppen und Gefässkategorien in zu kleiner Individuenanzahl vorlagen, um eine statistische Auswertung zu ermöglichen,

und dass ebenfalls der Frage nach Holzasche als wesentlichem Rohstoff der Glasherstellung im Jura nachzugehen wäre. Deshalb wurde einerseits eine zweite, ergänzende Serie von insbesondere farblosen und blauen Gläsern (78 Proben) vom ADB zusammengestellt und 2003/04 in Basel analysiert.<sup>231</sup> Andererseits wurde im Sommersemester 2002 ein Archäometrikurs der Universität Basel dem Thema der Herstellung von Waldglas gewidmet: Holz von unterschiedlichen Standorten wurde gesammelt, verascht, Aschenfraktionen zu Pottaschenextrakt aufbereitet, mit Quarzsand in unterschiedlichen Rezepturen vermischt und Glas bei unterschiedlichen Temperaturen im Labor experimentell hergestellt.<sup>232</sup> Dies brachte eine Reihe neuer Einsichten, namentlich über die Variabilität von Holzasche und ihrer mineralogischen Zusammensetzung. Erste Ergebnisse wurden in Vorträgen oder Postern<sup>233</sup> vorgestellt oder publiziert.<sup>234</sup>

Die Analysen sollten mehrere Fragen unterschiedlicher Natur beantworten:

1. Welche chemischen Typen – Natron-, Kali-, Bleiglas – sind vertreten?
2. Ist das in grossen Mengen gefundene Bruchglas zum Recycling herbeigeschafftes Altglas unterschiedlicher Herkunft – gesammelt in den nahegelegenen, grösseren Siedlungszentren wie Bern und Basel – oder handelt es sich um zu Bruch gegangene Endprodukte oder um Halbfabrikate oder Produktionsabfälle der Glashütte?
3. Ist das farblose, sich als *à la façon de Venise* präsentierende Glas tatsächlich Natronglas fremder Provenienz oder handelt es sich um nach besonderer Rezeptur hergestelltes Kaliglas lokaler Produktion?
4. Wie wäre im letzteren Fall der Herstellungsprozess zu verstehen?
5. Die Mehrzahl der aufgefundenen Glasfragmente mit grüner Farbe entspricht dem eigentlichen Waldglas, wie aber könnte das blaue Glas hergestellt worden sein?
6. Wie ist die silikatreiche und als Glasrohstoff infrage kommende Huppererde aus der Gegend von Court zusammengesetzt und ist sie für die Herstellung von Waldglas oder farblosem Glas geeignet?

230 Stern/Gerber 2002.

231 Stern/Gerber 2004a.

232 Stern 2002.

233 7. September 2002: Willem B. Stern, Glasofen Chaluet-3. Archäometrische Analysen. Öffentlichkeitsarbeit in Loveresse. 2003: Willem B. Stern, Yvonne Gerber und Christophe Gerber, Potassium-Calcium (K-Ca) Glass/Wood Ash/Potash Glass: Chemical Data of 18<sup>th</sup> Century Shards and of Experimentally Produced Glass. Poster, 16<sup>th</sup> AIHV, London. Februar 2006: Willem B. Stern und Yvonne Gerber, Glasanalysen von Court-Chaluet. Tagungsvortrag in Loveresse. November 2006: Yvonne Gerber, The Court-Chaluet Glass Hut and its Glass Composition. Vortrag am «Meetings of the Association for the History of Glass», London. Mai 2012: Yvonne Gerber, Glasproduktion aus lokalen Rohstoffen in Court, Pâturage de l'Envers, Kt. Bern, CH: Unterschiedliche Technologien im 18. Jahrhundert. Vortrag am «5. Internationalen Symposium zur archäologischen Erforschung mittelalterlicher und frühneuzeitlicher Glashütten Europas», Seiffen.

234 Stern/Gerber 2004b.



7. Ist die Glasherstellung ganz aus lokalen Ausgangsmaterialien – Huppererde, Baumasche und allfällige Pigmente – nachweisbar oder wahrscheinlich?
8. Mit welchem Verbrauch an lokalen Rohmaterialien wäre für die Betriebszeit der Glashütte von 1699 bis 1714 zu rechnen?
9. Mit welchen analytischen und statistischen Verfahren kann den obigen Fragen adäquat begegnet werden?

## 4.1.2 Werkstoff Glas, Definitionen

Willem B. Stern

Die meisten Festkörper im Umfeld und im Gebrauch des täglichen Lebens sind kristalliner Natur; silikatisches Glas als amorpher Feststoff und unterkühlte Flüssigkeit ist eher eine Ausnahmerecheinung. Der Mensch hat den komplexen Werkstoff Glas seit über 4000 Jahren genutzt, indem er natürliches oder von Menschenhand hergestelltes respektive artifizielles Glas als Ausgangsmaterial für Schmuck, Hohl- oder Flachglas herangezogen hat. Die genetische und stoffliche Vielfalt ist in Abbildung 69 schematisch dargestellt. Schon zu Beginn sei festgehalten, dass Glas

hier nicht nur das Naturprodukt oder von Menschenhand hergestelltes Rohglas meint, sondern auch die aus diesem Glas hergestellten Kunstprodukte wie Glasperlen, Armringe, Schmuck, Hohl- oder Flachglas.

### 4.1.2.1 Natürliche Gläser

Es gibt unter den natürlichen Gläsern drei Hauptgruppen: Tektite, vulkanische Gläser und Fulgurite.

Tektite sind meist klein dimensioniert und oft tropfenförmig oder kugelig mit typischerweise einem Durchmesser von wenigen Millimetern bis Zentimetern und darunter.<sup>235</sup> Sie kommen in ähnlicher chemischer Zusammensetzung unterschiedlichen geologischen Alters über den gesamten Globus verteilt vor und werden mit aus diesem Grund als extraterrestrische Körper betrachtet. Die Varietät Moldavit hat in der Neuzeit als Schmuckstein in Osteuropa Verwendung gefunden. Tektite werden als aluminiumreiche Silikate leicht mit vulkanischen Gläsern wie Obsidian verwechselt, obwohl sie ein höheres  $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Verhältnis aufweisen als Obsidiane und Kalium ( $\text{K}_2\text{O}$ ) gegenüber Natrium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) überwiegt. Vulkanische Gläser weisen im Allgemeinen eine granitische Zusammensetzung auf und werden dann als Obsidian bezeichnet.<sup>236</sup> Aber

<sup>235</sup> Bezborodov 1975, 15.

<sup>236</sup> Wimmenauer 1985, 175.

	Kalium-Kalk-Gläser			Natrium-Kalk-Gläser	
Anzahl Rohmaterialien	1	2	3	2	3
Glastyp	K-Ca-1 Strohglas	K-Ca-2 Waldglas	K-Ca-3 Pottaschenglas	Na-Ca-2 Natronglas	Na-Ca-3 Natronglas
Netzwerkbildner	Kaff/Spelzen	Quarzsand	Quarzsand	Quarzsand	Quarzsand
Netzwerkmodifizierer	Halme	Holzasche	Holzaschenextrakt	Halophytenasche	Anorg. Trona
Stabilisator	Halme	Holzasche	Kalk	Asche?, Kalk	Kalk
Alkalioxide	K >> Na	K >> Na	K >> Na	Na >> K	Na >> K
Stabilisator CaO/MgO	≈ 2–4	≈ 11	≈ 9	≈ 1.5	> 10
CaO/Alkali	≤ 0.5	≈ 4	≈ 1.5	≈ 2	≈ 3
Phosphat, Gew.-%	>> 1	> 1	< 1	≈ 1 ?	≈ 0 ?
Schmelztemperatur °C	≈ 800–1300	≈ 1300–1500	≈ 1000–1200	≈ 1200–1500	≈ 1200–1500
Verwendung	experimentell ?	9.–19. Jh. Flachglas Hohlglas	1300–21. Jh. Flachglas Hohlglas	seit 2. Jhtsd. (Flachglas) Hohlglas	seit 1. Jhtsd. Flachglas Hohlglas
Verbreitung	?	Zentraleuropa	Zentraleuropa	Naher Osten	Röm. Reich
Quelle	Stern 2010	Wedepohl 2003	Maus/Jenisch 1997/98	Wedepohl 2003	Wenigwieser 1992

Abb. 69: Schematische Übersicht über die Alkali-Kalk-Gläser.

es sind auch basaltische Gläser bekannt, Tachylite.<sup>237</sup> Beide Typen waren Ausgangsmaterial für schneidende Werkzeuge, Obsidian in seltenen Fällen auch für Objekte der Kunst.

Fulgurite, «Blitzröhren», gehören zwar zu den grossen Seltenheiten, können wegen ihres hohen Siliciumgehaltes ( $\text{SiO}_2$ ) jedoch leicht erkannt werden. Fulgurite entstehen durch Blitzschlag in kieselreiches Gestein, allenfalls kommen auch Meteoriteinschläge als Ursachen in Betracht. Der hohe Siliciumgehalt nahe 100 Gew.-% scheint erklärungsbedürftig. Fulgurite scheinen im Niltal als Rohmaterial für Kunstobjekte (Skarabäen) gedient zu haben.

#### 4.1.2.2 Artificielle Gläser

Artificielle, von Menschenhand geschaffene silikatische Gläser haben in den letzten vier Jahrtausenden eine zunehmende Verbreitung gefunden. Nach stofflichen Gesichtspunkten lassen sich bei den Alkali-Kalk-Gläsern fünf Hauptgruppen unterscheiden, die in Abbildung 69 schematisch zusammengefasst sind (vgl. Kap. 4.1.3). Allen Gruppen gemeinsam ist die prinzipielle Basis der Ausgangsmaterialien: Netzwerkbildner ( $\text{SiO}_2$ , mineralogisch meist Quarz in Form von Sand), Netzwerkwandler (Schmelzpunktsenker, Flussmittel in Form von Alkalicarbonaten, seltener Bleioxiden) und Stabilisator (Erdalkalicarbonat). Quarz weist mit 1700 °C einen so hohen Schmelzpunkt auf, dass er mit üblichen Öfen und in üblichen Schmelzhäfen nicht geschmolzen oder zu Glas verarbeitet werden kann. Zwar könnte mit Quarzsand und einem Flussmittel wie Soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) bei tiefen Schmelztemperaturen unter 800 °C ein klares, farbloses Glas produziert werden, aber es wäre gegenüber basischen und sauren Flüssigkeiten unbeständig. Erst die Zugabe von Rohmaterialien wie Kalk- oder Muschelschalenpulver (Calcit, Aragonit: beide  $\text{CaCO}_3$ ) macht das Glas beständig gegen chemische Verwitterung, sie erhöht allerdings auch die Schmelztemperatur massgeblich.

#### Natronglas

Natronglas, meist als Natrium-Calcium-Glas, ist nicht nur die bei Weitem meistverbreitete Gruppe, sondern auch die älteste, wohl im gleichen Zeitraum des zweiten Jahrtausends

vor unserer Zeitrechnung in Ägypten und Mesopotamien erfunden. Je nach verwendetem Netzwerkwandler ist systematisch zu differenzieren zwischen Tronaglas und Aschenglas. Trona, anorganisches Sodaäquivalent ( $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), kommt in feucht-gemäßigten Klimazonen wegen seiner hohen Löslichkeit kaum vor, kann aber zum Beispiel in Bitterseen des ariden Klimas geerntet werden, unter anderem im Wadi Natrun in Ägypten. Trona dürfte aluminium- und eisenarm und praktisch phosphatfrei ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) gewesen sein.<sup>238</sup>

Die Asche gewisser halophiler Pflanzen wie *Salicornia perennis*, *Tamarix spec.*, *Haloxylon salicornicum* weist einen hohen Sodagehalt ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) auf und kommt als Netzwerkwandler für die Glasherstellung ebenfalls in Frage. Der erhöhte Gehalt an färbenden Komponenten (Magnesium [ $\text{MgO}$ ], Eisen [ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ]) dürfte einer direkten Verwendung von Pflanzenasche entgegenstehen und eine Prozessierung der Asche nahelegen. Der Phosphatgehalt kalzinierter Halophytenasche scheint über 1 Gew.-%  $\text{P}_2\text{O}_5$  zu liegen.<sup>239</sup> Systematische experimentelle Studien zur Herstellung von Natronglas aus Trona, nativer und prozessierter Halophytenasche scheinen noch immer zu fehlen. Zur experimentellen Herstellung von Natronglas aus technischen Ausgangsmaterialien siehe Tanimoto/Rehren.<sup>240</sup>

Der hohe Magnesiumgehalt ( $\text{MgO}$ ) der Halophytenasche führt zu einem tiefen  $\text{CaO}/\text{MgO}$ -Verhältnis von 1.5 bis 2.4, wenn Halophytenasche ohne Aufbereitung oder Reinigung zur Glasherstellung herangezogen wird. In der Tat zeigen die frühen ägyptischen und mesopotamischen, aber auch sassanidischen Gläser ein entsprechend tiefes  $\text{CaO}/\text{MgO}$ -Verhältnis, im Gegensatz etwa zu römischem Glas (Quotient 14 bis 42, gemäss Mittelwert-Daten nach Wedepohl<sup>241</sup>). Analoges scheint auch für die Verhältniszahl von  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  zu gelten (vgl. Abb. 70):

Die Quotienten weisen darauf hin, dass im römischen Einflussbereich entweder prozessierte Halophytenasche oder Soda anorganischer Entstehung (Wadi Natrun in Unterägypten) für die Glasbereitung verwendet worden sein dürfte. Über die chemische und mineralische Zusammensetzung der Soda aus Evaporiten scheinen widersprüchliche Angaben vorzuliegen.<sup>242</sup> Der hohe  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ -

237 Schmid/Stern 1976.

238 Wenigwieser 1992; Wedepohl 2003, 11.

239 Wedepohl 2003, 175 Tab. 2A.

240 Tanimoto/Rehren 2008.

241 Wedepohl 2003, 174–180 Tab. 1A–5A.

242 Wenigwieser 1992; Shortland et al. 2011.

	Halophyten	Trona, stöchiom.	37H+63Q	Meso-potamien	Ägypten	Islamisch	Sassanidisch	Römisch Israel, Qumran	Römisch gesamt
Datierung				1450–700 v. Chr.	1391–900 v. Chr.	9.–13. Jh.	2.–7. Jh.	1.–4. Jh.	1.–5. Jh.
Probenzahl	Mittel 5	Berechnet	Mittel Berechnet	Mittel 60	Mittel 55	Mittel 214	Mittel 52	Mittel 45	Mittel 781
CaO/MgO	1.54	–	1.56	2.15	1.93	2.38	1.38	42.00	13.60
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	6.40	>> 20	6.30	7.85	10.30	5.11	4.53	20.50	29.20
Na <sub>2</sub> O/CaO	2.60	>> 20	2.60	2.20	2.40	1.70	2.20	1.95	2.57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.50	0	0.60	0.20	0.20	0.40	0.20	0.10	0.10

Abb. 70: Quotienten von glasbildenden Oxiden aus der Literatur. Den Mittelwerten von historischem Natrium-Calcium-Glas ist ein rechnerisch ermitteltes Glas aus 37 % Halophytenasche und 63 % Quarz (= 37H+63Q) gegenübergestellt. Infolge Fehlens von rezenten Trona-Analysen sind die aus der Mineralformel berechneten chemischen Grössen berücksichtigt.

Quotient des römischen Glases von über 20 spricht gegen eine Verwendung von unprozessierter Halophytenasche ebenso wie der tiefe Phosphatgehalt römischer Gläser.

In der Literatur werden Magnesium (MgO), Calcium (CaO) und Kalium (K<sub>2</sub>O) als Verunreinigung in der Asche halophiler Pflanzen als Differenzierungskriterium zwischen Glas aus (unprozessierter) Halophytenasche und Glas aus Soda aus Evaporiten vorgeschlagen.<sup>243</sup>

Als kurze Rekapitulation von anorganischer Flux versus organischer Flux diene die unten stehende Gegenüberstellung:

Natronglas = anorganischer Flux	= native Trona = prozessierte Trona (Shortland et al. 2011)
= organischer Flux	= native Halophytenasche = prozessierte Halophytenasche

Natrium-Calcium-Glas wurde schon früh in der Technik des Überfangs über Sandkern für die Herstellung polychromer Kleingefässe in Ägypten verwendet. Mit dem Aufkommen der Glaspfeife und des Glasblasens im Mittleren Osten des ersten Jahrhunderts vor der Zeitenwende setzt die grosse Verbreitung des Natrium-Calcium-Glases ein, obwohl die Ausgangsmaterialien, vor allem die Soda, als Flussmittel nur in relativ beschränkten geografischen Zonen erhältlich waren. Es stellt sich daher die Frage, ob Rohglas in Barrenform hergestellt und zu den Glashütten der gemässigten Zonen transportiert worden ist oder ob dort vor allem Glasrecycling betrie-

ben wurde oder ob ausschliesslich Soda selber als Handelsgut nach Zentral- und Nordeuropa verfrachtet wurde. Barrenglas scheint schon früh, um 1300 v. Chr., als Schiffsfracht nach Europa gelangt zu sein.<sup>244</sup> In römischer Zeit dürfte ausschliesslich Barrenglas/Rohglas von Primärglasproduktionszentren in Ägypten und der Levante nach Europa gelangt sein<sup>245</sup>, aber dies sei nur am Rande erwähnt, weil hier das Augenmerk nicht auf Natronglas, sondern auf Kaliglas gerichtet ist. Mit dem Aufkommen industriell hergestellter, chemisch reiner Soda im 19. Jahrhundert und gesunkenen Transportkosten für Massenware hat sich nicht nur die Glasherstellung insgesamt stark gewandelt, sondern es sind normierte Glasqualitäten möglich geworden. Glas wird seit jener Zeit immer weniger in kleinen bis mittelgrossen Produktionsstätten hergestellt, sondern in durchrationalisierten Grossbetrieben, von denen einige wenige heute den gesamten Weltmarkt beliefern.

Bemerkenswert ist, dass kaum je alle essenziellen Ausgangsstoffe für die Herstellung von Natrium-Calcium-Glas am selben Ort vorhanden gewesen sind, nämlich reiner Quarzsand, Soda, Kalk und die notwendigen, bedeutenden Mengen an Brennmaterial für den Betrieb des Schmelzofens. Die Herstellung von Rohglas, Flach- und Hohlglas muss als hochspezialisierter Arbeitsprozess gesehen werden, der neben den erwähnten Ausgangsmaterialien bedeutende Erfahrung voraussetzte.

### Kaliglas

Kaliglas scheint eine Erfindung des zentral-europäischen Mittelalters gewesen zu sein. Zwischen dem 8./10. und 19. Jahrhundert

<sup>243</sup> Wedepohl 2003, 9.

<sup>244</sup> Wedepohl 2003, 38; 174 Tab. 1A; Amrein/Wolf 2010, 74.

<sup>245</sup> Siehe Literaturangaben in Amrein/Wolf 2010, 75.

wurde dort für die Herstellung von Flach- und Hohlglas in grossem Massstab – aber dezentral in kleinen Hüttenbetrieben – sogenanntes Wald- oder Holzschenglas hergestellt. Die Grossproduktion von Holzschenglas kam erst Ende des 19. Jahrhunderts mit der Verfügbarkeit von preiswerter Soda aus dem Solvayprozess (seit 1865) weitgehend zum Erliegen. Nur die Produktion von Kalium-Calcium-Glas in Form von sogenanntem Kristallglas hat sich in Böhmen bis in die Gegenwart erhalten.<sup>246</sup>

Ausgangsmaterialien waren neben Quarzsand die Asche von Holz, namentlich der Buche (*fagus sylvatica*), dessen oft hoher Calciumgehalt gleichzeitig als Stabilisator dienen konnte (vgl. Abb. 69). Im Gegensatz zu Natronglas, das in römischer Zeit wohl mit mindestens drei essenziellen Ausgangsmaterialien hergestellt wurde, erfordert Kaliglas prinzipiell nur deren zwei. Die frische Asche von Holz enthält neben Kalium ( $K_2O$ ) und Calcium ( $CaO$ ) auch Silicium ( $SiO_2$ ) in wechselnden Anteilen sowie Aluminium ( $Al_2O_3$ ), Eisen ( $Fe_2O_3$ ), Mangan ( $MnO$ ), Magnesium ( $MgO$ ) und vor allem Phosphat ( $P_2O_5$ ). Je nach Bodenbeschaffenheit nimmt ein Baum unterschiedliche Mengen an Mg, Ca, Mn, Fe auf, in jedem Fall aber das für ihn essenzielle Phosphor und Kalium. Einige der erwähnten Elemente färben nicht nur die Asche, sondern auch das mit ihr hergestellte Glas.

Aus Holzasche lassen sich durch Waschen in einfacher Weise die leicht löslichen Kalisalze extrahieren und von den schwerer löslichen magnesium-, calcium- und phosphorhaltigen Komponenten und Silikaten abtrennen, wie eigene Experimente gezeigt haben (Abb. 125).<sup>247</sup> Das kalireiche Extrakt ist praktisch farblos, ätzend und als Flussmittel für die Glasherstellung geeignet. Das Extrakt besteht je nach Lagerungsdauer und -umständen mineralogisch überwiegend aus Pottasche ( $K_2CO_3$ ) und Kalicinit ( $KHCO_3$ ) sowie wechselnden Anteilen an Kaliumsulfat (Arcanit,  $K_2SO_4$ ) sowie Kaliumchlorid (Sylvit,  $KCl$ ). Ein aus solcher Pottasche und Quarzsand hergestelltes Glas ist konsequenterweise arm an färbenden Komponenten und Phosphat, während Gläser aus nativer Holzasche und Quarzsand entsprechend reicher an  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  und  $P_2O_5$  sind.<sup>248</sup> Pottaschenglas aus Aschenextrakt plus Quarzsand und (Holz-) Aschenglas aus Ge-

samtasche plus Quarzsand lassen sich aufgrund des Phosphatgehaltes anhand der Glasanalyse unterscheiden.<sup>249</sup>

Der grundsätzliche Unterschied zwischen Holzschenglas (K-Ca-2-Glas) und Pottaschen- /Extraktglas (K-Ca-3-Glas) in der Glasproduktion von Court, Pâturage de l'Envers und die daraus resultierenden technologischen Konsequenzen – Farblosigkeit, tiefere Schmelztemperaturen, tiefer Phosphatgehalt als Unterscheidungskriterium – sind im ersten Vorbericht bereits ein erstes Mal konstatiert und hervorgehoben worden. Der Gebrauch von Pottasche in der Kaliglasherstellung geht auch aus weiteren Datenquellen hervor: unter anderem Barrera/Velde für Frankreich und insbesondere Maus/Jenisch für den von Court, Pâturage de l'Envers benachbarten Schwarzwald.<sup>250</sup>

Die Roh- und Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Kalium-Calcium-Glas – Quarzsand, kalium- und calciumreiche Asche, Holz zum Betrieb der Glashütte – sind in gewissen Fällen am selben Ort zu haben, zwar nicht in Siedlungen, aber «im Wald». Die Bezeichnung «Waldglas» mag sich somit nicht nur auf die Herkunft der Ausgangsmaterialien beziehen, sondern auch auf den Ort der Glasbereitung.

### Bleiglas

Bleiglas aus Bleioxid (Lithargit,  $PbO$ ) und Quarzsand wurde seit dem Neuen Reich Ägyptens, aber auch in Mesopotamien hergestellt.<sup>251</sup> Sehr oft handelt es sich um opakes oder durch zugefügte Metallsalze gefärbtes Glas, wobei komplexe Antimon- und Zinnoxide ( $Pb_2Sb_2O_7$ ,  $PbSnO_3$ ) eine besondere Rolle gespielt haben. Die Zugabe von Tenorit ( $CuO$ ) führt zu smaragdgrünem, die Zugabe von Cuprit ( $Cu_2O$ ) zu rubinrotem Bleiglas, was bei der Herstellung von romanischen und gotischen Kirchenfenstern eine bedeutende Rolle gespielt hat.<sup>252</sup>

### 4.1.3 Zum Herstellungsprozess von Kalium-Calcium-Glas

Die naturwissenschaftliche Seite der Glasherstellung ist von Wedepohl<sup>253</sup> in umfassender Weise dargestellt worden, während die histo-

246 Ullmann 1919, 232; Ullmann 1957, 170 Nr. 1.

247 Stern/Gerber 2002; Stern/Gerber 2004a/2004b.

248 Stern/Gerber 2009.

249 Stern/Gerber 2009, 111–113; 116–117.

250 Erster Vorbericht s. Stern/Gerber 2002. Barrera/Velde 1989; Maus/Jenisch 1997/98.

251 Wedepohl 2003, 22.

252 Wedepohl 2003, 24.

253 Wedepohl 2003.

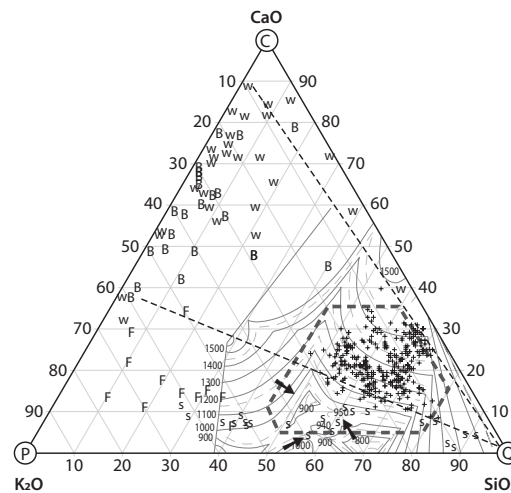


rischen Aspekte zum Beispiel von Frank<sup>254</sup> beleuchtet worden sind. Kalium-Calcium-Glas, nachfolgend K-Ca-Glas oder Waldglas genannt, wird durch geeignete Mischung von Holzasche oder Holzaschenextrakt mit quarzreichem Sand hergestellt (Abb. 71; für Einzelheiten vgl. Kap. 4.3).

Alte Bezeichnungen für Rohmaterialien der Glasherstellung lassen meistens ein weites Feld der Deutung zu; nicht einmal der Unterschied der Elemente Natrium und Kalium war bis in das 18. Jahrhundert bekannt. Manche Prozeduren der Glasherstellung waren zudem wohlgehütete Geheimnisse ihrer jeweiligen Erfinder. Die Komplexität der Materie bringt es mit sich, dass trotz zahlreicher historischer Quellen längst nicht alle technologischen Einzelheiten der historischen Glasbereitung als geklärt gelten können.

Kaliglas wird durch drei chemische Hauptkomponenten weitgehend definiert, nämlich (als Oxide) durch das als Netzwerkbildner wirkende Silicium ( $\text{SiO}_2$ ), durch das als Netzwerkwandler essenzielle Kalium ( $\text{K}_2\text{O}$ ) sowie den Stabilisator Calcium ( $\text{CaO}$ ). Die drei Komponenten machen beim analysierten Glas von Court, Pâturage de l'Envers insgesamt zwischen 90 und 97 Gew.-% des Glases aus und lassen sich somit als Dreieck darstellen (Abb. 71). Für dieses ternäre Stoffsystem wurden schon recht früh experimentell Schmelzdiagramme ermittelt.<sup>255</sup> Das Diagramm zeigt, dass gewisse (durch Pfeile hervorgehobene) sogenannte eutektische Bereiche einen besonders tiefen Schmelzpunkt von unter  $1000^\circ\text{C}$  aufweisen. Reiner Quarzsand schmilzt bei rund  $1700^\circ\text{C}$ , bei einer Temperatur somit, die mit Holz gefeuerten Öfen nicht erzielt werden kann. Keramische Teile des Ofens und die Glasmacherhöfen selber würden bei extrem hohen Temperaturen zwischen  $1500$  und  $1700^\circ\text{C}$  zu schmelzen beginnen.

Die ternäre Darstellung eignet sich besonders gut für die Darstellung von Waldglas, weil das Produkt Glas (Kreuze [+]; in Abb. 71) zwingend auf einer (gedachten) Verbindungsline (in Abb. 71 gestrichelt) zwischen den Ausgangsmaterialien/Edukten Holzasche (B oder W) und Quarz (Q) liegen muss. Der Ort auf der Verbindungsgeraden wird durch das Mischungsverhältnis der beiden Edukte definiert. Das  $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ -Verhältnis der meis-



ten historischen K-Ca-Gläser liegt zwischen  $40/60 = 0.67$  und  $90/10 = 9.0$ . Eutektische Zusammensetzungen müssten einem Verhältnis von  $20/80 = 0.25$  entsprechen. Das Diagramm erklärt, warum Waldglas aus Holzasche und Quarzsand nur bei hohen Temperaturen erschmolzen werden kann und nicht bei eutektischen, tiefen Temperaturen unterhalb  $1000^\circ\text{C}$ . Solche Gläser müssten mit der Asche krautartiger, calciumarmer Pflanzen wie Riedgras, Farn oder Getreide hergestellt werden. Historische K-Ca-Gläser liegen in einem relativ engen Verbreitungsgebiet, das durch die gestrichelten Verbindungslinien (mit  $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ -Quotient  $0.67$  bis  $9.0$ ) zwischen den Projektionspunkten von Holzasche und Quarz definiert wird. Übliche Schmelztemperaturen historischer Gläser liegen zwischen geschätzten  $1050$  und  $1450^\circ\text{C}$ . Die hier nicht berücksichtigten Oxide (Summe  $3$  bis  $10$  Gew.-%: Aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Eisen ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Mangan ( $\text{MnO}$ ), Magnesium ( $\text{MgO}$ ), Phosphat ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )) dürften die tatsächlichen Erweichungs-/Schmelztemperaturen erhöhen. Die vorliegenden Laborexperimente bestätigen diesen Sachverhalt, obwohl die Anwesenheit von  $\text{P}_2\text{O}_5$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  als chemische Hauptkomponenten das Schmelzverhalten beeinflussen könnte (vgl. Kap. 4.3.3). Schmelzdiagramme mit Berücksichtigung von  $\text{P}_2\text{O}_5$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sind in der Literatur aber leider nicht vorhanden. Hier besteht Bedarf an weiterführender Forschung. Auf bestehende Einschränkungen bei der Verwendung der ternären Darstellung mit  $\text{SiO}_2$ - $\text{CaO}$ - $\text{K}_2\text{O}$  wird später eingegangen.

Abb. 71: Die essenziellen Bestandteile Asche und Quarzsand sowie Glas im ternären System der glasbildenden Hauptkomponenten  $\text{CaO}$  (C) –  $\text{SiO}_2$  (Q) –  $\text{K}_2\text{O}$  (P). Das trapezförmige Feld repräsentiert die chemische Zusammensetzung historischer K-Ca-Gläser (+ = vgl. mit Brill 1999; Barrera/Velde 1989; Wedepohl 2003). Eingebildet ist das Schmelzdiagramm nach Morey/Kracek/Bowen (1930). Mischungen von Holzaschen (B = Buche; W = Holzasche generell) mit Quarzsand/Huppererde (Q) ergeben Glaszusammensetzungen (+) auf entsprechenden Verbindungsgeraden (gestrichelt), die das Schmelzdiagramm bei Temperaturen oberhalb  $1000^\circ\text{C}$  schneiden. Theoretische eutektische Minima (Pfeile) von  $900$  und  $950^\circ\text{C}$  sind mit Holzaschen nicht zu erzielen, wohl aber mit Aschen krautartiger oder halmartiger Pflanzen (F = Farn; Riedgras; s = Getreide).

254 Frank 1982.

255 Morey/Kracek/Bowen 1930.

Die zurzeit bestehenden Wissenslücken hängen auch mit der Tatsache zusammen, dass mit instrumenteller Analytik zwar schnell und zuverlässig die chemische Zusammensetzung von Glas bestimmt werden kann – die publizierten Analysen historischen Glases gehen in die Tausende<sup>256</sup> –, dass die Analyse aber noch nichts Verbindliches über Einzelheiten der verwendeten Ausgangsmaterialien und deren Mischungsverhältnisse aussagen muss und damit auch nichts Genaues über Schmelz- und Arbeitstemperaturen während der Glasherstellung. Vom Produkt Glas kann mit anderen Worten nicht unbedingt auf die verwendeten Edukte (Roh-, Ausgangsmaterialien), ihre Massenanteile und Verarbeitungsweise geschlossen werden. Hinzu tritt die bereits angesprochene nomenklatorische Problematik bezüglich Ausgangsmaterialien und ihre Umschreibung in historischen Quellen sowie die stoffliche Heterogenität dieser Ausgangsmaterialien selbst.

Weder besteht Quarzsand in der Regel ausschliesslich aus  $\text{SiO}_2$ , noch ist Kalk als Stabilisator in allen Fällen reines  $\text{CaCO}_3$ . Silikatischer Sand enthält neben Quarz meist Feldspäte unterschiedlicher Zusammensetzung oder Tonmineralien als Umwandlungsprodukte von Feldspäten, so dass der verwendete Sand neben  $\text{SiO}_2$  meist noch  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sowie Erdalkali- und Alkalioxide enthält. Kalk kann neben Calcium- auch Magnesiumcarbonat (Mergel) und Tonmineralien enthalten, in jedem Fall ist neben dem relevanten  $\text{CaO}$  als Stabilisator zunächst Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) als Hauptkomponente anwesend, das im Verlauf der Glasbereitung bei höheren Temperaturen um 750 bis 850 °C ausgetrieben wird. Magnesium (Mg) kann als Periklas (chemisch  $\text{MgO}$ ) rekristallisieren. In frischer Asche kann zunächst noch  $\text{CaO}$  vorhanden sein, das aber an Luft zu Portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) hydratisiert oder re-carbonatisiert und sich in Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) umwandelt. Diese Umwandlungen verlaufen unter Gewichtszunahme und beeinflussen somit die Rezeptur der Ingredientien/Edukte.

Schwieriger noch wird es mit der Analyse von Pflanzen, die je nach Spezies und Standort bei analogem Aufbereitungsprozess ganz unterschiedliche Aschen liefern. Erst technische Produkte des 19. und 20. Jahrhunderts sind

chemisch-mineralogisch definiert und ermöglichen eine Rezeptur für einen bestimmten, gleichbleibenden Schmelzprozess mit reproduzierbaren Produkteigenschaften. Historische Gläser basieren auf Ausgangsmaterialien stark wechselnder Zusammensetzung, die eine strikte und gleichbleibende Rezeptur ausgeschlossen und grosse Erfahrung in der Beurteilung der Materialien und der Ofenführung voraussetzten.

Eine technologisch wichtige, aber in der Literatur bisher kaum beachtete Differenzierung des K-Ca-Glases betrifft die Unterscheidung von Pottaschenglas (hergestellt aus mindestens drei Edukten, Holzaschenextrakt = Pottasche, Quarzsand und Kalk als Stabilisator; im Text als K-Ca-3-Glas bezeichnet) und Holzaschenglas (hergestellt aus zwei Edukten, der integralen, nativen Holzasche inklusive ihrer färbenden Bestandteile [Mg, Mn, Fe] und Quarzsand; im Text als K-Ca-2-Glas bezeichnet). Pottaschenglas scheint – wie die zahlreichen publizierten Analysen von historischem Kaliglas zeigen – insgesamt selten hergestellt worden zu sein. Es enthält wegen des läuternden Extraktionsprozesses wenig färbende Komponenten und Phosphat. Diese Bestandteile verbleiben im Extraktionsrückstand, wie Experimente gezeigt haben.<sup>257</sup> Phosphat ist somit ein wichtiger Indikator für die Herstellungstechnologie.<sup>258</sup> Die Farbstichigkeit von Holzaschenglas kann aber auch mit entfärbenden Zusätzen verringert werden und deswegen kann die Farblosigkeit von Glas technologisch unterschiedliche Ursachen haben:

1. Die verwendeten Ausgangsmaterialien/Edukte sind praktisch frei von färbenden Komponenten. Dies ist der Fall beim neuzeitlichen Natron-Kalk-Glas. Oder es wurden die Rohmaterialien, namentlich die Holzasche, geläutert, ein Extrakt (Eluat) gewonnen und zur Pottasche eingedampft. Diese Pottasche (engl. *potash*) ist als Kaliumcarbonat das essenzielle Flussmittel; es enthält keine schwer löslichen Salze oder Verbindungen wie zum Beispiel Apatit (Calciumphosphat,  $\text{Ca}_5\text{Cl}/\text{F}(\text{PO}_4)_3$ ). K-Ca-Gläser mit weniger als 1 Gew.-%  $\text{P}_2\text{O}_5$  sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Pottaschengläser (K-Ca-3-Gläser) und nicht Holzaschengläser (K-Ca-2-Gläser). Pottaschengläser

256 Brill 1999.

257 Stern/Gerber 2002; Stern/Gerber 2004a/2004b.

258 Stern/Gerber 2009; vgl. bezüglich Mangengehalt und Farbcharakter auch Maus/Jenisch 1997/98, 397–398; Tab. 15).

sind infolge des Läuterungsprozesses nicht nur ärmer an Aluminium-, Eisen- und Manganoxiden, sondern tendenziell auch ärmer an Spurenelementen, sofern diese nicht aus dem Quarzsand stammen.

2. Die verwendeten Ausgangsmaterialien enthalten färbende Metallsalze aus dem Netzwerkbildner (Sand) und vor allem der Holzasche. Durch Zugabe von Oxidantien (Arsen- oder Manganverbindungen) kann die Farbstichigkeit des Glases verringert werden, wie dies beim Natrium-Calcium-Glas bis in das 20. Jahrhundert geschehen ist. Das aus Holzasche als Netzwerkwandler hergestellte Kaliglas weist einen Phosphatgehalt ( $P_2O_5$ ) von wesentlich über 1 Gew.-% auf und kann deswegen als Holzaschenglas erkannt und angesprochen werden.

Dies verleitet zu einem semantisch-nomenklatorischen Exkurs. Farbloses Glas (*verre incolore*) wird gelegentlich als entfärbtes Glas (*verre décoloré*) bezeichnet, auch wenn nicht bekannt oder gesichert ist, dass ein entfärbender Produktionsschritt tatsächlich stattgefunden hat – die neutrale Bezeichnung ist in jedem Fall vorzuziehen, seitdem wir wissen, dass durch geeignete Vorbehandlung der Asche, das heisst durch Extraktion der Rohasche, farbloses Glas ohne eigentliche Entfärbung (etwa durch Manganoxide) in einfacher Weise hergestellt werden kann.<sup>259</sup>

Eine besondere und bisher wenig beachtete Tatsache ist die mineralogische Vielfalt der Holzasche und des Aschenextraktes (Pottasche). Das für die Pflanze essenzielle Kalium tritt in der Holzasche nicht nur als Pottasche auf, sondern je nach Anwesenheit von Chlorid und Sulfat auch als Sylvín ( $KCl$ ) und/oder Arcanit ( $K_2SO_4$ ), die sich aber als Netzwerkwandler nicht oder nur bedingt eignen und im Produkt Glas nicht (mehr) vollständig nachweisbar sind, oft auch analytisch nicht erfasst werden. Holzasche kann zudem weitere, komplexe Carbonate enthalten wie Bütschliit ( $K_6Ca_2(CO_3)_5 \cdot 6H_2O$ ) oder Fairchildit ( $K_2Ca_4(CO_3)_2$ ), die sich möglicherweise erst bei der Lagerung von Asche ausbilden und in frischer Asche vielleicht nicht oder nur untergeordnet vorhanden sind.

Die letztgenannten Mineralien sind vermutlich nicht als Netzwerkwandler anzusprechen, sie führen in der Aschenanalyse zu hohen Kaliumwerten, die aber nicht stöchiometrisch als Pottasche oder Kalicinit bei der rechnerischen Schmelzpunktabschätzung (vgl. Abb. 127) herangezogen werden dürfen. Die Thematik ist im gegenwärtigen Zeitpunkt von den wenigsten Glasfachleuten erkannt und auch nicht umfassend erforscht.

Eine aus der Literatur<sup>260</sup> bekannte und im Laborexperiment ebenfalls angetroffene Schmelzphase neben eigentlichem Glas ist die Galle, eine klare und farblose, auf dem geschmolzenen Glas sich anreichernde Phase. Röntgenbeugungsaufnahmen zeigen, dass es sich dabei eindeutig um den oben erwähnten Arcanit handelt. Arcanit entzieht der Schmelze Kalium, so dass aus der Glasanalyse nicht direkt auf den Kaligehalt der Holzasche geschlossen werden kann und vice versa. Über eine andere, im Laborexperiment nicht angetroffene mögliche Schmelzphase (*Sandever*) wird unten unter «Fritte» berichtet.

Von Sylvín darf man annehmen, dass er bei einem allfälligen Vorbereitungsprozess der Glasherstellung, dem Fritten von Sand und Asche, eine Rolle spielt. Wird holzkohlefreie Asche und Quarzsand einer Temperatur von 900 °C ausgesetzt, so werden sich in der Mischung mehrere Prozesse abspielen, die nicht nur zu einem Gewichtsverlust führen, sondern auch zu einer Sinterung der Ausgangsmaterialien. Allfälliger Kalzit verliert sein Carbonat ( $CO_2$ ) bei rund 750 °C, was zu einem Gewichtsverlust von 44 % führt. Kalicarbonat verlieren gleichfalls  $CO_2$  (–36 %). Sylvín beginnt zu schmelzen und durchtränkt das Gemisch, während Arcanit erst bei 1070 °C zu schmelzen beginnt.

Während die Masse des Quarzsandes nur bei Anwesenheit von Tonmineralien infolge Calcination sinkt, verringert sich die Masse der Asche somit um grössenordnungsmässig 40 % – mehr bei Anwesenheit hydratisierter Phasen. Ein ursprüngliches Verhältnis von 2 Gewichtsteilen Asche und 1 Gewichtsteil Sand verändert sich auf diese Weise auf 1.2 zu 1 bis 1 zu 1 (vgl. auch Kap. 4.3.3).

Ob ein Fritten der glasbildenden Rohmaterialien auch in Court, Pâturage de l'Envers vorgenommen worden war, wird aufgrund

259 Stern/Gerber 2004b;  
s. auch Poster, 16<sup>th</sup> AIHV,  
London 2003.  
260 Frank 1982, 79.

der Analyseergebnisse der als «Fritte» angesprochenen Proben nicht schlüssig beantwortet werden können. Eine Fritte müsste als Halbfabrikat der Glasherstellung dasselbe  $\text{CaO/K}_2\text{O}$ -Verhältnis aufweisen wie das resultierende Glas, und dieselben Aluminium- ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Eisen- ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und Phosphatanteile ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), wenn durch den Frittungsprozess lediglich die flüchtigen Bestandteile entfernt, aber keine Hauptbestandteile zugesetzt oder entfernt werden (vgl. hierzu insbesondere Kap. 4.2.3.5).

Unabhängig von der Frage, ob in Court, Pâturage de l'Envers ein Fritten der Rohmaterialien durchgeführt wurde, stellt sich die Frage, mit welchen Ofentemperaturen bei der Herstellung von K-Ca-Glas generell zu rechnen ist. Überschlagsrechnungen aufgrund der Glaszusammensetzung sind möglich, sofern es aus den drei essenziellen Oxiden  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  und  $\text{K}_2\text{O}$  besteht und nicht zu viele weitere schmelzpunktrelevante Elemente enthält. Das analysierte Glas aus Court, Pâturage de l'Envers besteht zu 90 bis 97 Gew.-% aus den genannten drei Oxiden; eine Abschätzung der Ofenbetriebstemperatur ist somit möglich und zeigt, dass aufgrund der vorliegenden Oxidkonstellation keine eutektischen Minima mit Temperaturen unter  $1000^\circ\text{C}$  zu realisieren waren. Realistische Schätzungen verweisen auf Schmelztemperaturen von  $1150$  bis  $1450^\circ\text{C}$ , was schon in Nähe der Betriebstemperatur moderner Glasöfen kommt (vgl. Abb. 71). Diese hohen Temperaturen stellen hohe Anforderungen an die Ofenkonstruktion, das Ofenmaterial und den Betrieb des Ofens über Tage und Wochen. Analoges gilt für die Schmelzhäfen und Glasmachergerätschaften wie die Glasmacherpfeifen.

Zusammenfassend kann bezüglich K-Ca-Glas festgehalten werden, dass die beiden technologischen Typen Wald-/Gesamtaschenglas (K-Ca-2-Komponenten) und Pottaschenglas (K-Ca-3-Komponenten) bei Schmelztemperaturen zwischen  $1100$  und  $1400^\circ\text{C}$  erschmolzen worden sind, dass genaue Angaben aus dem ternären Schmelzdiagramm von Morey/Kracek/Bowen<sup>261</sup> aber nicht abgeleitet werden können, weil natürliche Ausgangsmaterialien weitere, eventuell schmelzpunktbestimmende Komponenten enthalten und weil in der Rohasche Kalium nicht nur als netzwerk-

wandelnde Pottasche oder Kalicinit vorliegt, sondern in von Fall zu Fall auftretenden weiteren kaliumhaltigen Mineralisationen, die sich am Schmelzprozess nicht beteiligen. Viele Fragen, auch zur Bedeutung und Funktion der Fritte, sind im gegenwärtigen Zeitpunkt offen und harren der Abklärung.

Bezüglich der Wiederverwendung von Altglas durch Einsammeln und Einschmelzen von Glasscherben (Recycling) ist davon auszugehen, dass der chemische Nachweis im Fall von Waldglas dann möglich ist, wenn Na-Ca-Glas und K-Ca-Glas miteinander aufgeschmolzen wurden und sich Natrium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) und Kalium ( $\text{K}_2\text{O}$ ) im Glas etwa die Waage halten.<sup>262</sup> Auf diese Weise lässt sich aber nur jener Teil identifizieren, bei dem die recycelte Komponente einen wesentlichen Teil des Gemenges ausgemacht hat (s. dazu auch unten stehende theoretische Aufstellung für Glasrecycling):

---

#### Recycling von Altglas:

- |   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. Bruch aus K-Ca-Glas                  | --> neues K-Ca-Glas       |
| 2. Bruch aus K-Ca- mit etwas Natronglas | --> neues K-Ca-Mischglas  |
| 3. Bruch aus Na-Ca-Glas                 | --> neues Na-Ca-Glas      |
| 4. Bruch aus Na-Ca- mit etwas Kaliglas  | --> neues Na-Ca-Mischglas |
- 

Die Frage, ob und in welchem Umfang Glasrecycling betrieben worden ist, dürfte generell schwierig zu beantworten sein. Wenn bei der Natron-Glasherstellung eine gewisse Menge Kalium-Altglas eingesetzt worden ist, dürfte eine entsprechende Beweisführung *a posteriori* vielleicht möglich sein. Entsprechendes gilt für die Kali-Glasproduktion unter Verwendung von recyceltem Natronglas. Letztere Situation war für die Hütte von Court, Pâturage de l'Envers vermutet worden, konnte aber durch die Analyse von Scherben und Produktionsabfällen widerlegt werden (vgl. hierzu auch Kap. 4.4).

261 Morey/Kracek/Bowen 1930.

262 Vgl. Maus/Jenisch 1997/98, 378–379; 391 Tab. 11; 420–422 Tab. 22.



#### 4.1.4 Kurzer historischer Abriss

Yvonne Gerber

Die ältesten Glasfunde stammen aus Mesopotamien und Ägypten, wo im 3. Jahrtausend v. Chr. Perlen und Ähnliches als die ältesten Glasobjekte hergestellt wurden. Ab der Mitte des 2. Jahrtausends v. Chr. sind erste Glasgefäße in Mesopotamien, kurz darauf in Ägypten (18. Dynastie) nachweisbar.<sup>263</sup> Die vorherrschende Verarbeitungstechnik im 2. Jahrtausend v. Chr. war wohl die Beschichtung des Kerns aus tonhaltigem Quarzsand mit kaltem, pulverisiertem Glas, das daraufhin durch Erhitzen verschmolzen wurde. Im 1. Jahrtausend v. Chr. hingegen dürften die Körper der kerngeformten Glasgefäße durch Abspulen eines heißen Glasfadens um den Kern hergestellt worden sein.<sup>264</sup> Nach Erkalten konnte jeweils der Metallstab, der in der Mitte des Ton-Sand-Kerns angebracht war, herausgezogen und der poröse Sandkern herausgekratzt werden. Das frühe Glas aus dem Vorderen Orient wurde aus einem Gemenge von Sand (u. a. aus zerkleinertem Quarzgestein gewonnen) und Asche aus sodahaltigen Pflanzen (Halophyten) in einem Mischverhältnis von 1 zu 1 hergestellt.<sup>265</sup>

Nach der Mitte des 2. Jahrtausends v. Chr. gab es vereinzelte, wohl multifunktionelle Werkstätten, in denen unter anderem auch Rohglas hergestellt wurde, wie entsprechende Funde (Ofenreste, Glashäfen bzw. Tiegel mit [Roh-]Glasrückständen, Halbfabrikat-Glas, etc.) aus Amarna und/oder Piramesses im Nildelta zu belegen scheinen.<sup>266</sup> Zumeist eingefärbte Glasrohlinge (Kupfer- oder Kobaltgefärbtes Rohglas<sup>267</sup>) wurden in Ägypten an weiterverarbeitende Werkstätten geliefert, die daraus monochrome oder polychrome Glasobjekte herstellten. Die Glasproduktion erlebte in Ägypten wie auch in Mesopotamien eine Blütezeit mit hochwertigen Gefäßen und edlem Schmuck, die in Ägypten erst um die Jahrtausendwende, einhergehend mit dem Niedergang der Wirtschaftskraft, mehrheitlich auszusetzen schien. Ab der zweiten Hälfte des 1. Jahrtausends v. Chr. nahm der Glashandel im Mittelmeergebiet wieder zu, ohne dass man die Produkte immer bestimmten Glas-

zentren in Mesopotamien, Ägypten, Syrien, und Phönizien sicher zuordnen könnte.

Im Verlaufe des frühen 1. Jahrtausends v. Chr. dürfte die Umstellung von Halophytenasche auf mineralische Soda (Trona) als Flussmittel für die Glasherstellung stattgefunden haben. Trona ist ein natürlich vorkommendes Natriumcarbonat-Mineral, das in der Antike im Wadi el-Natron, einem Wüstental circa 80 km südlich von Alexandria, gewonnen wurde. Es wurde aus den Ablagerungen sommerlich eindunstender Seen gesammelt.<sup>268</sup> Dieser neue Glaswerkstoff brauchte, im Gegensatz zu den pflanzlichen Sodagläsern, den Zusatz von Kalk als Glasstabilisator. Dies wurde von den glasherstellenden Werkstätten erst allmählich erkannt, Natrongläser aus der frühesten Produktionsphase zeigen nämlich noch eine calciumarme Zusammensetzung und waren sehr anfällig für Korrosion durch Feuchtigkeit und Flüssigkeit (sog. Glaskrankheit), was ihren Gebrauch und ihr Überleben im Boden und im Allgemeinen erschwerte. Nur wenige dieser frühen Natrongläser sind infolgedessen erhalten, es sind meist Grabfunde, wie zum Beispiel in Ägypten<sup>269</sup> oder Nimrud.<sup>270</sup> In der zweiten Hälfte des 1. Jahrtausends war dieser Umstand erkannt; ab dieser Epoche zeigen Natrium-Calcium-Gläser (Na-Ca-3-Glas; vgl. auch Kap. 4.1.2.2) einen genügend hohen Calciumgehalt (> 7 % CaO). Dieses frühe Na-Ca-3-Glas enthielt im Mittel 73.4 % SiO<sub>2</sub>, 18.4 % Na<sub>2</sub>O und 8.2 % CaO.<sup>271</sup> In der Massenproduktion von Natrium-Calcium-Gläsern (in der Literatur auch Soda-Kalk-Glas genannt) während der römischen Kaiserzeit wurde die in ihrer mengenmässigen Zusammensetzung erprobte Grundrezeptur aus Flusssand, Alkalirohstoff Trona (Na<sub>3</sub>H(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O) und Kalk nicht mehr wesentlich verändert. Der Wunsch nach farblosem Glas wurde vorherrschend. Die dafür verwendeten Rohmaterialien waren geradezu optimal: Die Trona war arm an färbenden Nebenbestandteilen (vgl. Kap. 4.1.2.2, s. v. Natronglas), der Quarzsand hatte einen niedrigen Eisengehalt; das Glas war allgemein arm an Kalium, Magnesium und Phosphor. Das seit dem 1. Jahrhundert v. Chr. recht einheitliche Soda-Kalk-Glas wurde in wenigen, speziellen Zentren in Ägypten<sup>272</sup> und der Levante, nahe der Quelle von Rohmaterialien

263 von Saldern 2004, 5–9; 30–39.

264 Vgl. dazu Stern/Schlick-Nolte 1994, 28–31.

265 Wedepohl 2003, 38; 46; 174 Tab. 1A.

266 Rehren/Pusch 1997; Wedepohl 2003, 36–37; von Saldern 2004, 630; Smirniou/Rehren 2011 mit ausführlichen Literaturverweisen.

267 Vgl. Rehren 2001, 485.

268 Wenigwieser 1992; Wedepohl 2003, 11–12; Shortland et al. 2011.

269 Schlick-Nolte/Werthmann 2010, 236.

270 Reade/Freestone/Simpson 2005; s. Diskussion dazu in Reade/Freestone/Bourke 2009, 51–53.

271 Wedepohl 2003, 46.

272 Siehe u.a. Nenna et al. 2005.

und Brennstoff, in grossen Mengen hergestellt (Primärwerkstätten) und die Glasrohlinge zu den vielen Glasateliers in der damaligen römischen Welt zur Weiterverarbeitung exportiert (Sekundärwerkstätten).<sup>273</sup>

Die Technik zur Herstellung von Glasgefässen wurde durch die Einführung der Glasmacherpfeife entscheidend verändert. Bis anhin wurden Glasgefässe in Formen gegossen oder, vor allem seit hellenistischer Zeit, über eine Form abgesenkt.<sup>274</sup> Mit der Glasmacherpfeife konnten die Gefässe frei geblasen werden und liessen somit dünnwandigere Gefässe und eine sehr viel grössere Formenvielfalt zu. Der genaue Zeitpunkt, wann die eigentliche Glasmacherpfeife (aus Metall) zum ersten Mal in Erscheinung trat, ist nach wie vor unklar. Früheste Belege für geblasene Glasgefässe fanden sich im Abfall einer Glaswerkstatt im *Jewish quarter* in Jerusalem<sup>275</sup>, in der sich nebst Glasschalen, die über eine Form abgesenkt waren, auch wenige Glasgefässe (kleine Glasflaschen mit engem Hals und ausladendem Rand) befanden, deren Randausformungen Rückschlüsse daraufhin zulassen, dass sie aus Glasrohren geblasen waren. Damit vergesellschaftet waren circa 100 Münzen von Alexander Jannaeus (104–76 v. Chr.). Somit scheint die Entdeckung des Glasblasens in der ersten Hälfte des 1. Jahrhunderts v. Chr. bzw. gegen Mitte dieses Jahrhunderts stattgefunden zu haben. Erst dieser neuen Technik, dem Glasblasen, ist die römische Massenproduktion zu verdanken, die quasi vier Jahrhunderte florierte. In der späteren Glasproduktion (Natron- und Waldglas) ist die Glasmacherpfeife erst recht nicht mehr wegzudenken.

Die Gläser der islamischen Produktion (ab dem 9. Jh.) zeigen wiederum ein Soda-Asche-Glas (Asche aus sodahaltigen Pflanzen), auch in einem Teil der Provinzen wie Palästina und Ägypten, wo vorher Soda-Kalk-Glas (Verwendung von mineralischer Soda) verarbeitet worden war.<sup>276</sup> Diese Glasrezeptur ist nicht neu, sie war im Vorderen Orient vor der Einführung des Natronglases (aus anorganischer Soda) gängig und hatte sich während der römischen Zeit im sassanidischen Persien gehalten. Trotzdem musste die Rezeptur wieder neu gefunden und erprobt werden, was nicht ganz ohne Fehlschläge blieb.<sup>277</sup> In Bet She'arim wurde ein Schmelztank mit ei-

nem grossen Glasblock, der eine fehlerhafte Schmelze nach neuem, nicht erfolgreichem Versuchsrezept (Soda-Asche-Glas) darstellte, ausgegraben. Die angesetzte Glascharge war während des Feuerungsprozesses (sehr wahrscheinlich nur bis zu 1050 °C) wegen des ungewöhnlich hohen Kalkgehaltes (> 15 %) nicht vollständig zur Schmelze gelangt – es hätten Temperaturen von > 1100 °C erreicht werden müssen. Der Glasblock wurde einfach am Ort zurückgelassen, es fanden keine Bemühungen statt, Teile davon zu bergen und nochmals einer Schmelze zuzuführen. Die Anlage wird ins frühe 9. Jahrhundert datiert.

### **Wechsel von Natronglas zu Kaliglas (historisch)**

Noch in merowingischer Zeit (ca. 500–850) wurde in Europa qualitätsvolles Natronglas verarbeitet.<sup>278</sup> Import von Natronglas aus Ägypten war jedoch im Frühmittelalter nicht mehr vollumfänglich gewährleistet. Temporärer Engpass an Natron-Rohglas konnte, wie am Beispiel von Glas aus dem Zeitraum der Angeln und Sachsen (ca. 550–700) gezeigt, teilweise dadurch aufgefangen werden, dass dem Natronglas (teils zeitgenössischer Rohglasimport, teils recycelt) Pflanzenasche oder angeblich sogar Holzasche zugefügt wurde.<sup>279</sup> Jedoch ist die chronologische Stellung dieser sehr kleinen Gruppe von chemisch modifizierten Gläsern noch in Diskussion, ein späterer zeitlicher Ansatz ist ebenfalls denkbar.

Um den Glasbedarf abzudecken und die Schwierigkeiten mit dem Nachschub von mineralischer Soda und/oder Natron-Rohglas aus Ägypten jedoch grundsätzlich zu umgehen, wurde Ende des 8. Jahrhunderts eine europäische Glasproduktion mit ausschliesslich einheimischen Rohstoffen initiiert. Es fanden sich Fragmente eines neuen Glastyps im Brandschutt der ersten Pfalz Karl des Grossen in Paderborn. Der Brandhorizont dient als *terminus ante quem*. Die Pfalz, die nur wenige Jahre benutzt worden war, dürfte durch den Sachsenaufstand 778 zerstört worden sein.<sup>280</sup> Im Schutt fanden sich Fragmente von einfachen und qualitätsvollen Trinkgefässen, Fenserscheiben und Mosaiksteinen, ebenso wie auch Reste von einem Soda-Kalk-Rohglasbarren und Reste von Glashäfen mit derselben chemischen Glaszusammensetzung wie

273 Amrein/Wolf 2010, 74.

274 Vgl. dazu Stern/Schlick-Nolte 1994, 68–71.

275 Israeli/Katsnelson 2006, 411–414; 430.

276 Wedepohl 2003, 73–74.

277 Freestone/Gorin-Rosen 1999.

278 Siehe auch Wedepohl 2003, 75; 89.

279 Freestone/Hughes/Stapleton 2008, 37–42.

280 Wedepohl 1998, 13; Wedepohl 2003, 17; 91.

das Rohglas. Dieses Rohglas ist dem merowingischen Glas in seiner chemischen Zusammensetzung noch sehr verwandt. Also hat man im 8. Jahrhundert noch Soda-Kalk-Glas verarbeitet. Gleichzeitig fand sich damit vergesellschaftet aber auch ein neuer Glastyp: Glas, das aus Holzasche und Quarz hergestellt worden war und somit Kalium statt Natrium als Schmelzzusatz enthält. Es ist bis anhin das älteste bekannte Vorkommen von reinem Holzaschenglas.<sup>281</sup> Andere bekannte kaliumreiche Gläser bzw. Alkali-Misch-Gläser ( $K_2O > Na_2O$ ) aus Europa sind ausnahmslos spätbronzezeitliche Perlen, die aus Sand und Pflanzenasche bzw. aus Sand und einem sehr reinen Gemisch aus Alkalien als Flussmittel hergestellt sind.<sup>282</sup> Bei dem zu Beginn der Karolingerzeit für die Glasproduktion eingesetzten Rohstoff handelte es sich vollumfänglich um Holzasche, ein Mittel, das zuvor schon als Waschmittel eingesetzt worden war. Holzaschenglas fand sich nicht nur in vier Fenserscheiben und in einem Gefäßfragment in der Pfalz von Paderborn, sondern auch in anderen karolingischen Gründungen wie dem Reichskloster Corvey und dem Kloster Brunshausen-Gandersheim sowie in einem frühen Grubenhaus in Höxter.<sup>283</sup> Das frühmittelalterliche Glas unterscheidet sich vom hoch- und spätmittelalterlichen Holzaschenglas darin, dass die frühen Holzaschengläser einen bis zu 10 % höheren Siliciumgehalt ( $SiO_2$ ), aber weniger als halb so hohe Kaliumkonzentrationen ( $K_2O$ ) und 1,5 % höheren Natriumgehalt ( $Na_2O$ ) aufweisen.<sup>284</sup> Die Glasmacher der frühmittelalterlichen Holzaschengläser scheinen noch Erfahrungen mit der römisch-merowingischen Soda-Kalkglas-Produktion gehabt zu haben. Der höhere Silicium- ( $SiO_2$ ) und Calciumgehalt ( $CaO$ ) erforderte eine höhere Schmelztemperatur und damit eine bessere Ofentechnik.<sup>285</sup> Der relativ hohe Natriumgehalt in einigen frühmittelalterlichen Produkten war wahrscheinlich auf die Zugabe von Soda-Kalk-Altglas zurückzuführen, das im frühen Mittelalter noch vorhanden gewesen sein muss. Die Variabilität der mittelalterlichen Holzaschengläser geht hauptsächlich auf die Variabilität des Rohstoffes Holzasche zurück (mehr dazu, unter Kap. 4.3.1).

Nach dem karolingischen, frühen Mittelalter ging der Glasbedarf in Europa für einein-

halb Jahrhunderte (11./12. Jahrhundert) erheblich zurück, um erst wieder gegen 1150 als Folge von vielen Stadtgründungen auf «deutschem» Gebiet (Stadtstaaten) und dem erhöhten Bedarf an Kirchenfenstern im Zusammenhang mit der gotischen Bauhochkonjunktur anzusteigen und ihren Höhepunkt zwischen 1250 und 1300 zu erreichen. Waren es vorher nur Adel und Klerus, die Produktion und Verbrauch bestimmten, kamen mit dem Bürgertum neue Volksschichten zu Wohlstand, die ebenfalls nach diesen Gütern verlangten. Mit dem steigenden Bedarf an Holzaschenglas reichten die zuvor klösterlichen Glaswerkstätten nicht mehr aus, es begann gegen Ende des 12. Jahrhunderts eine eigenständige Glasfertigung in kommerziellen und wohl auch privatwirtschaftlichen Betrieben. Die (Wald-)Glashütten wanderten nun zu den wesentlichen Rostoffen in die meist im adeligen Besitz befindlichen Wälder.<sup>286</sup>

Die frühesten Hinweise auf Glashütten im Schwarzwald in der Literatur stammen aus dem 11./12. Jahrhundert. Im 13. Jahrhundert treten in Schriftquellen vermehrt aus Nennungen oder charakteristischen Flurnamen abgeleitete Hinweise zu Glashütten auf. Es darf wohl angenommen werden, dass seit dem 12. Jahrhundert von einer florierenden Glasproduktion im Südwestschwarzwald ausgegangen werden kann. Eine Übersicht über die Glashütten im Schwarzwald geben Maus/Jenisch.<sup>287</sup> Anfang des 13. Jahrhunderts begann auch die Glasherstellung im Spessart, der als eines der grossen Zentren der Glasherstellung in Deutschland angesehen werden darf.

Als wichtigster Glastyp in den Glashütten in Mitteleuropa des hohen Mittelalters (Mitte 11. – Mitte 13. Jahrhundert) setzte sich klar das Holzaschenglas durch. Sodaglas bildete nun kostbare Importware. Die Standorte der Glasfertigung hatten sich von den Klöstern in die Wälder als wesentlichen Rohstofflieferanten verlagert. Die Nähe zu den Wasserwegen und Absatzgebieten wie auch die grossen Holzreserven waren wohl bei allen frühen Hüttengründungen (im niedersächsischen Bergland, im Schwarzwald und im Spessart) ausschlaggebend. In der Provence und im Languedoc (Südfrankreich) konnten für die Zeit des 13. und 14. Jahrhunderts schon 42 Glashütten lokalisiert werden. Produkte

281 Zu dessen Nachweis s. auch Wedepohl 2003, 17–18.

282 Amrein/Wolf 2010, 75–76; s. auch Wedepohl 1998, 13–14.

283 Wedepohl 1998, 14; Wedepohl 2003, 86–87; 91; 181–183 Tab. 6A.

284 Wedepohl 1998, 14–16; Wedepohl 2003, 92–94.

285 Wedepohl 2003, 19; 92.

286 Wedepohl 2003, 96–97; 126; mit Angaben von diversen frühen Glashütten in Mitteleuropa: 109–110.

287 Maus/Jenisch 1997/98, 437–498.

und Produktionsabfälle aus hochmittelalterlichen Betrieben in den Argonnen, aber auch Glasprodukte von spätmittelalterlichen Fundplätzen wie Paris, Orleans, Angers, Rouen und Châlons-sur-Marne wurden von Barrera/Velde<sup>288</sup> vorgestellt. Ebenso existieren hochmittelalterliche Glashütten in England in Surrey/Sussex Weald und in Cheshire und Staffordshire.<sup>289</sup> Im Verlauf des Spätmittelalters dürfte man wohl auch angefangen haben, manch ursprünglich importiertes Sodaglasprodukt in Holzaschenglas zu imitieren.<sup>290</sup>

Die von Wedepohl angesprochenen Holzasche-Kalk-Gläser ( $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O} > 1$ , respektive meistens  $> 3$ ) in so manchen Glashütten des späten Mittelalters<sup>291</sup> sollen nur am Rande erwähnt, aber nicht im Detail diskutiert werden: Erst im 15. Jahrhundert gelang einer grösseren Anzahl deutscher Glashütten die Verbesserung ihrer Öfen (Erhöhung der Ofentemperatur  $> 1300^\circ\text{C}$ ) zum Erreichen der geforderten Schmelze, um calcium- und siliciumreicheres Glas (sog. Holzasche-Kalk-Glas) herzustellen.<sup>292</sup> Im Gegensatz zu beispielsweise Frankreich, wo schon immer siliciumreicheres Glas produziert worden ist (einhergehend mit besserer Ofentechnik).

Die hoch- und spätmittelalterlichen Glasproduktionsbetriebe arbeiteten rohstoffintensiv. Brennstoff und Holzasche als wesentlicher Rohstoff ihrer Glasproduktion bezogen sie aus den sie umgebenden Wäldern. Nach einer gewissen Zeitspanne war eine Verschiebung des Hüttenstandorts notwendig, um Raubbau zu vermeiden und um wieder näher von neuen Ressourcen zu sein. Die adeligen und kirchlichen Besitzer der Wälder strebten eine schonende Holznutzung an. Deshalb wurden im Spätmittelalter und in der frühen Neuzeit Zunftordnungen und Gläser-Bundesbriefe erlassen, die den Holzverbrauch und die Organisation der Hütten regelten.<sup>293</sup> Der Übergang vom späten Mittelalter zur Neuzeit hat sich in der europäischen Glasproduktion kaum bemerkbar gemacht. Flachglasbedarf mag aufgrund der Fenster in Privathäusern gestiegen sein. Wegstein<sup>294</sup> analysierte insbesondere neuzeitliches Gefäss- und Flachglas sowie Produktionsrückstände aus den Hütten des Kaufunger Waldes: sogenannte Holzasche-Kalk-Gläser mit niedrigem Kalium- (im Mittel 4.4 %), aber hohem Calciumgehalt und

höherem Natriumoxid als durchschnittliches mittelalterliches Glas.

Eine kurze Einführung in die Glasproduktion im Jura geben Glatz und Gerber.<sup>295</sup> Glashütten des 16. Jahrhunderts und früher (evtl. sogar bis in das 14. Jahrhundert zurückgehend) sind meistens nur aufgrund archivalischer Dokumente belegt. Die Glashütte von Court, Pâturage de l'Envers, deren Betriebszeit zu Beginn des 18. Jahrhundert zu datieren ist, ist eine der vielen Glashütten, die seit dem 17. Jahrhundert gleichzeitig im Zentraljura (Sonceboz, La Heutte, Court, etc. und am Ufer des Doubs)<sup>296</sup> nachzuweisen sind. Die Glashütte von Court, Pâturage de l'Envers (1699–1714) dürfte ein ähnliches Spektrum an Glaserzeugnissen produziert haben wie andere Glashütten im Jura auch; in der Tradition der Holzaschengläser, wie nachfolgende Untersuchungen aufzeigen werden.

## 4.2 Die Glasproduktion von Court, Pâturage de l'Envers

### 4.2.1 Ausgangslage

Yvonne Gerber

Der Archäologische Dienst des Kantons Bern stellte eine genügend grosse Anzahl Probenmaterial, das destruktiv analysiert werden durfte, zur Verfügung. Für die Analyse von Vorteil ist jeweils eine genügend grosse Probenanzahl, bevorzugt sind ungefähr 15 bis 20 Stück pro definierte Kategorie der Endprodukte, Produktionsabfälle und Halb-/Zwischenfabrikate. Das Probenmaterial setzte sich wie folgt zusammen (Abb. 72):

Die farblosen und die sogenannten fili-granverzierten Glasgefässfragmente gehören zu einer Gruppe von filigranen Gefässen, die als *à la façon de Venise* bezeichnet werden und wohl von der venezianischen Glasproduktion inspiriert worden sind (chap. 3.3.1.1; 3.4.2.2; fig. 13, 23 und 58). Die farblosen Gefässe wurden bei der Katalogisierung durch den ADB zunächst als *décoloré*, entfärbt, bezeichnet. Man ging davon aus, dass der ursprüngliche Grünstich, für den das Holzaschenglas bekannt ist, unter Zugabe von zum Beispiel

288 Barrera/Velde 1989.

289 Wedepohl 2003, 126–127.

290 Wedepohl 2003, 128.

291 Wedepohl 2003, 133–137.

292 Wedepohl 2003, 134; 218–221 Tab. 27A.

293 Siehe dazu Wedepohl 2003, 145–147.

294 Wegstein 1996.

295 Glatz 1991, 74–82; Gerber 2010, 24–32.

296 Vgl. Gerber 2010, 25, fig. 14.



**Produkte:  
Kategorie****Hohlglas****Total Farbe****89**

grün / vert

blau / bleu

farblos /  
incolorefarblos, filigran-  
verziert / filigrané  
blanc et incoloreMilchglas,  
opakweiss /  
opaque blanc

G

B

F

Fi

M

Kelchglas mit Balusterschaft /  
*verre à jambe*

25

4

–

15

6

Kelchglas mit gestochenem Fuss /  
*verre à pied refoulé*

10

10

–

–

–

Becher / *gobelet*

14

9

1

3

0

1

Flasche / *bouteille*

19

10

4

2

1

2

Fläschchen / *fiolle*

18

14

3

1

–

–

Deckel / *couvercle de coupe*

1

–

–

–

1

–

Glas unbestimmt / *verre indéterminé*

2

–

–

–

1

1

**Flachglas; Fensterglas****34**Butzenscheiben / *cive*

19

19

Zylinderglas / *verre plat*

15

15

**Produktionsabfälle:  
Kategorie****Glas****Total Farbe****76**grün /  
vertblau /  
bleufarblos /  
incolorebraun-orange /  
brun orangé; rot,  
rosa / rouge, roséweiss /  
blanc

G

B

F

Br; R, Rs

W

Pfeifenabschlag / *meule*

27

13

7

7

–

–

Glastropfen / *goutte*

25

12

5

7

1

–

Glasbrocken / *verre brut*

24

11

3

7

2

1

**Halb- / Zwischen-Fabrikat  
bzw. Produktionsabfall****30**grün /  
vertblau /  
bleugrau /  
grisnicht bestimmt /  
indéfiniweiss /  
blancschwarz /  
noir

G

B

Gr

x

W

N

Glasfritte / *fritte*

30

4

9

13

2

1

1

**Ofenmaterial, Glashäfen:  
Kategorie****mit Glasresten****Total Farbe****46**

grün / vert

blau/grün /  
bleu/vertgrau /  
grisgelb /  
jauneweiss /  
blancnicht bestimmbar  
/ indéterminableOfenwand / *brique réfractaire*

18

2

3

1

3

2

7

weiss und  
hellgrün /  
blanc et vert  
clairblau/grün /  
bleu/vertweiss und  
rau /  
blanc et  
rugueuxGlashafen / *creuset*

28

9

4

3

–

12

–

**Rohmaterial:  
Kategorie****Total****ohne Glasreste****66**«Huppererde» / *sable sidérolithique*

18

Fragmente des Feuerungskanaals / *alandier*

10

Ziegelstein / *brique, terre cuite*

10

Keramik / *céramique*

18

Asche / *cendre*

5

Ton / *argile*

5

Abb. 72: Zusammenstellung der analysierten Glasprobenfragmente, Fragmente des Glasschmelzofens inkl. Feuerungskanal, Ziegelstein, der Keramik und der Asche-, Ton und Quarzsandanalysen; Probenanzahl, Total: n = 341, davon werden Proben: n = 229 in den nachfolgenden Auswertungen verwendet. Die hier angegebenen Symbole, Farben und Abkürzungen stehen nachfolgend für alle Abbildungen (mit Ausnahme von Abb. 74d, 78–79, 90, 103, 107, 111, 121, 123, 127).



Abb. 73: Court, Pâturage de l'Envers. Auswahl von untersuchten Glasprobenfragmenten. Von oben nach unten und von links nach rechts: Kelchglasschäfte und -füsse, Becherböden, Wandungen, Hälse und Böden von Flaschen, Pfeifenabschläge und Flachglasabfälle. Die XV-Nummern entsprechen den Basler Labornummern (s. Annex 2). Massstab 1:2.

Mangan(IV)-oxid (Braunstein) bewusst verhindert werden konnte, um sich der venezianischen Kristallglasproduktion anzunähern. Wir haben den neutraleren Begriff «farblos» gewählt, um nicht bereits einen Herstellungsprozess vorwegzunehmen.

Der Begriff *verre brut* kann in der Glasforschung auch als «Rohglas» verstanden werden, gemeint wären damit Glasbarren aus einer Primärproduktion, die an sekundäre Ateliers zur

Weiterverarbeitung abgegeben sind. Christophe Gerber vom ADB verwendet den Begriff *verre brut* für «Glasbrocken» aus der Glasproduktion selbst, die nicht näher bestimmt und/oder kategorisiert werden konnten, vereinfacht gesagt: «Glasbruch». Das heisst, diese Glasfragmente müssten zwingend dieselbe chemische Zusammensetzung wie auch die finalen Glaserzeugnisse selbst aufweisen.

Da man aber bei der ersten Kategorisierung nicht wissen konnte, ob es sich um Glasbruch aus der Produktion vor Ort oder um für Recycling gesammeltes Glas aus nahen Stadtzentren handelt, wurden diese Fragmente mit dem Überbegriff *verre brut* bezeichnet. Sie werden in der statistischen Auswertung deshalb erst unter der Rubrik «Produktionsabfall» berücksichtigt, obwohl sie eigentlich – wie wir jetzt wissen – sehr fragmentierte Reste der Glasproduktion vor Ort darstellen.

Die zur Verfügung gestellten Probenfragmente wurden vom ADB zuvor sorgfältig dokumentiert und fotografiert (Abb. 73), bevor im Geochemischen Labor von den Probestücken jeweils circa 1 g Probenmenge entnommen worden ist. Die Zuordnungen zu den Gefässkategorien, die Farbuweisungen und die Bestimmung der Halb- bzw. Abfallprodukte erfolgten durch Christophe Gerber.

Die Stratigrafie, aus denen die 229 Glasendprodukte, Halb-/Zwischenfabrikate bzw. Produktionsabfälle stammen, weist drei Haupthorizonte auf. Einer davon gilt als Auflashorizont (Pos. A4a), die beiden anderen entsprechen den Produktionsschichten (z. B. Pos. A30 a–c und A89).<sup>297</sup> Aufgrund der Analyseergebnisse (s. Kap. 4.2.3.1 und 4.2.4) können wir davon ausgehen, dass die Glasfragmente aus den verschiedenen Schichten chemisch gleich sind. Deshalb wird auf eine Schichtunterscheidung verzichtet.

Die Analysewerte aller 341 Proben sind am Schluss in Annex 2 zu finden. Die Analysewerte von Ofenmaterial, Fragmenten des Feuerungskannals, Glashäfen, Keramik und Asche werden zwar in dieser Tabelle ebenfalls aufgeführt, da es sich aber nicht direkt um Glasanalysen handelt, hier nicht mehr im Weiteren besprochen.

#### 4.2.1.1 Fragestellungen

Die Analysen sollten mehrere Fragen unterschiedlicher Natur beantworten. Die Auflistung der Fragen befindet sich in Kap. 4.1.1, eine Kurzzusammenfassung der Antworten in Kap. 4.4.

### 4.2.2 Analytik

Willem B. Stern

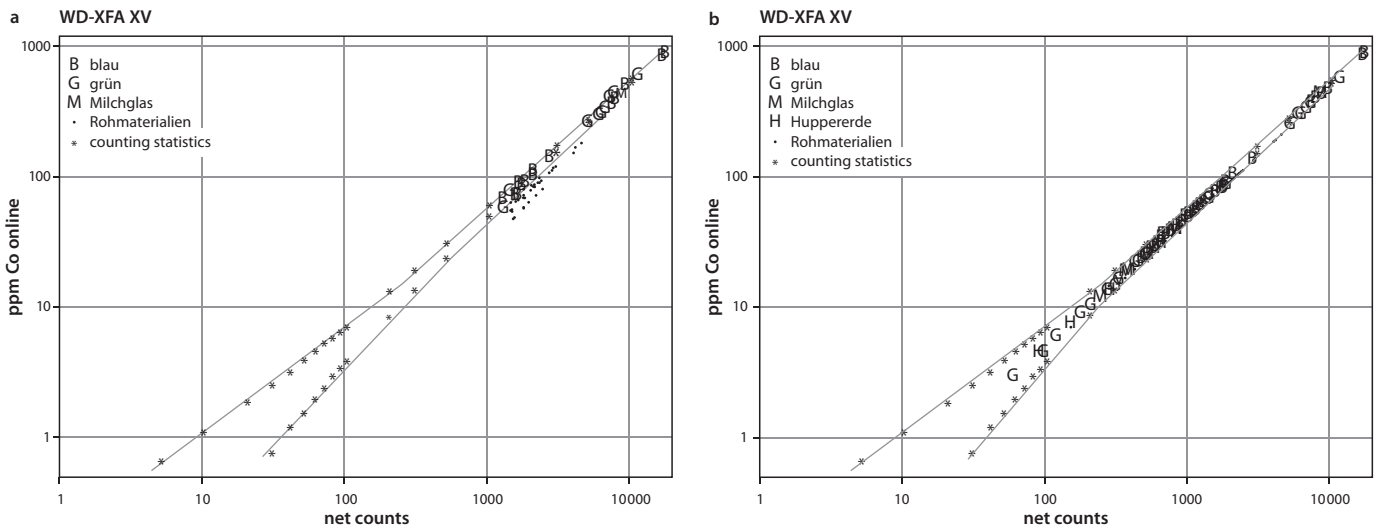
Die stoffliche Analyse von Kulturgegenständen und Kunstobjekten ist eine Herausforderung, weil Kulturgüter in der Regel schützenswert sind und durch eine naturwissenschaftliche Untersuchung nicht in Mitleidenschaft gezogen werden dürfen (Stern 2001). Klassische Methoden der analytischen Chemie (gravimetrische Fällungsanalyse) setzen in der Regel grosse Probenmassen voraus. Dies hat den Vorteil der Repräsentativität, aber den Nachteil einer oft fehlenden Verfügbarkeit.

Die Materialanalyse soll nach Möglichkeit alle oder doch die meisten relevanten Haupt- und Nebenbestandteile des Prüflings qualitativ nachweisen und nach Möglichkeit auch quantitativ oder wenigstens semiquantitativ erfassen. Neuere instrumentelle Methoden wie AAS (Atomabsorptionsspektrometrie), ICP (induktiv gekoppelte Plasmaspektrometrie), RMS (Röntgenmikrosondenanalytik), RFA/XFA (Röntgenfluoreszenzspektrometrie) kommen zum Teil mit klein dimensionierten Analyseproben im Milligramm- bis Gramm-bereich aus, setzen aber zwingend einen in allen Raumdiagonalen homogenen Probenkörper voraus.

#### 4.2.2.1 Röntgenfluoreszenzspektrometrie (XFA)

Leider sind anorganische archäologische Fundobjekte – Glas, Keramik, Metalle – sehr oft von Korrosionsschichten überzogen und insofern stofflich heterogen aufgebaut. Glas erfährt durch die Bodenlagerung an der oberflächennahen Schicht eine Abreicherung löslicher Komponenten, namentlich der Alkalioxide, die als Netzwerkwandler grosse Bedeutung haben. Eine sonst zerstörungsfreie Methode wie die energiedispersive XFA erfasst von gewissen Elementen wie Natrium (Na) oder Magnesium (Mg) nur die obersten 10 bis 20 Mikrometer (0.01 bis 0.02 mm), von anderen wie Kalium (K) oder Eisen (Fe) eine Schicht von 100 bis 200 Mikrometern und von Barium (Ba) oder Silber (Ag) von einigen Zentimetern.

<sup>297</sup> Gerber 2010; chap. 2.1, 2.2.6 und fig. 35–36.



a: Akkumulierte Nettozählrate (x-Achse) und mittels Analysesoftware gefundene Elementkonzentrationen von Co in ppm (0.0001 Gew.-%, y-Achse), aufgeschlüsselt nach Farben (blau, grün) und Materialgruppen (Rohmaterialien, Huppererde/Quarzsand, Milchglas). Kleine Messraten unter 1000 Nettopulsen (und unter 60 ppm) werden von der Analysesoftware eliminiert und nicht in Konzentrationen umgerechnet.

b: Werden die Nettopulsraten gemäss empirisch ermittelter Geradengleichung («offline») in Konzentrationseinheiten umgerechnet, so sind auch Gehalte unter 60 ppm noch bezifferbar.

Abb. 74: Versuch einer Spurenelementauswertung am Beispiel von Kobalt (Co) und Nickel (Ni). Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenzspektrometrie (WD-XFA) an hochverdünnten Schmelzlingen, wie sie für die Analyse von chemischen Hauptkomponenten in Gebrauch sind.

Es hängt somit von der Fragestellung und der Beschaffenheit des Untersuchungsobjektes ab, ob eine solche schonende Analyseverfahren die erwartete Antwort geben kann oder nicht. Eine für alle Fragestellungen und Probenbeschaffenheiten ideale Analyseverfahren existiert leider nicht.

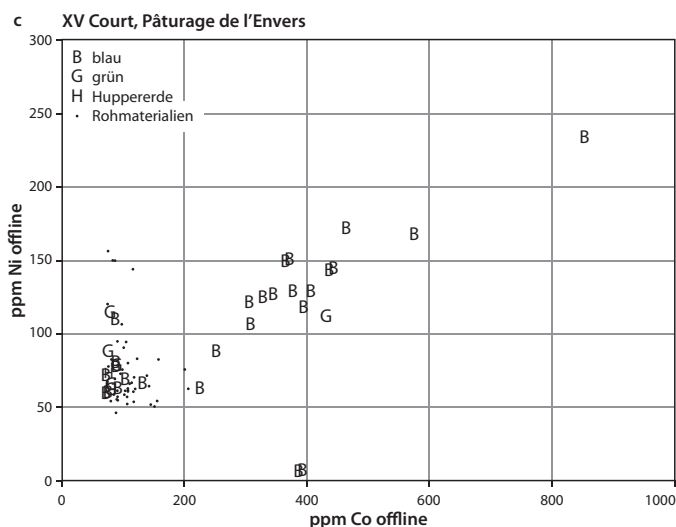
Ist Untersuchungsmaterial in genügender Stückzahl und in hinreichender Masse verfügbar, so empfiehlt sich eine der oben erwähnten instrumentellen Analyseverfahren. Massgebend ist, dass der analytische Aufwand im Verhältnis zur Relevanz der archäologischen Fragestellung vertretbar bleibt. Die Versuchung, die Probenzahl einzuschränken um den analytischen Aufwand zu reduzieren, ist erfahrungsgemäss eine schlechte Strategie: «eine Analyse ist keine Analyse», gilt als Maxime seit den Anfängen der analytischen Chemie, solange die oben erwähnte stoffliche Homogenität des Prüflings nicht als bewiesen gelten kann.

Im Fall von Court, Pâturage de l'Envers liegen Tausende von Glasscherben und Glasfragmenten vor, deren konservatorischer Wert eine destruktive Analytik nicht *a priori* ausschliesst. Fragmente konnten somit in genügender Stückzahl bereitgestellt und für eine quantitative, destruktive Analyse vorbereitet werden.

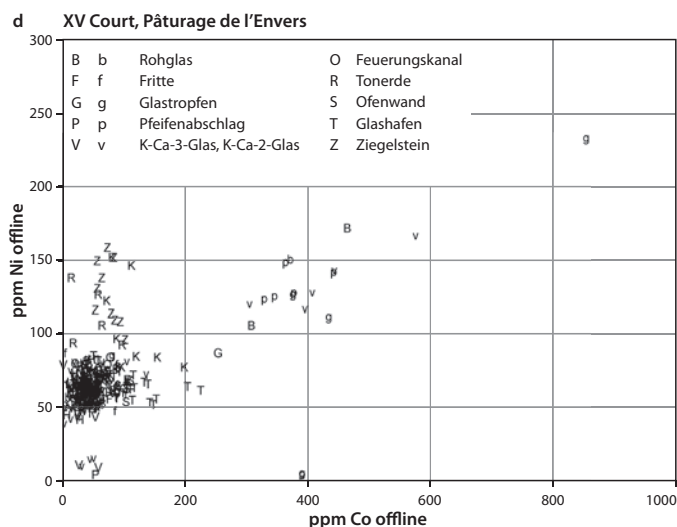
Im Geochemischen Labor der Universität Basel standen drei verschiedene Methoden zur Wahl. Neben der erwähnten ICP-Analyse, die flüssige Proben voraussetzt, kamen die energiedispersive (ED-XFA) und die wellenlängendispersive (WD-XFA) in Frage; beide basieren auf fester Probe aus entweder gepresstem Pulver oder auf normierten Schmelzlingen. Der Analysevorgang selbst ist zerstörungsfrei, die Probenkonditionierung hingegen nicht.

In beiden Fällen muss von jedem Prüfling (hier: Glasfragment) mindestens ein etwa 0.5 bis 1 g schweres Stück abgebrochen, zerkleinert und fein gemahlen werden. Der Mahlvorgang darf das Probengut nicht kontaminieren und ist je nach dessen Härte aufwendig (Borkarbidmühle). 300 mg des getrockneten Glaspulvers werden in der Achatschale mit 4700 mg getrocknetem Lithiumtetraborat ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) als Schmelzmittel gemischt und unter Normbedingungen in Edelmetalltiegel (95 Platin/05 Gold) aufgeschlossen, in Kokillen mit ebenem und poliertem Boden gegossen und programmgesteuert abgekühlt. Der so hergestellte Schmelzling hat einen Durchmesser von 32 mm und eine Dicke von rund 2 mm. Er wird bis zur Analyse (und danach) in luftdichten Kunststoffbeuteln aufbewahrt. Die Routineanalyse umfasst 11 Haupt- und Nebenkomponten sowie 25 prospektive Spurenele-





c: Grafische Auswertung der offline gewonnenen Analysewerte der Spurenelemente Co (x-Achse) und Ni (y-Achse) mit Aufschlüsselung der Glasfarben. Nichtglas-Materialien sind zum Vergleich als Punkte wiedergegeben.



d: Analoge Auswertung nach Materialgruppen und Differenzierung von K-Ca-2-Glas/Waldglas als Kleinbuchstaben, und K-Ca-3-Glas/Pottaschenglase als Grossbuchstaben. Die Nichtglasmaterialien sind mit eigenen Buchstaben angegeben (Begriffe vgl. mit Abb. 72).

mente. Die arbeitsaufwendige Herstellung von Schmelzlingen führt zu homogenen, verdünnten, geometrisch definierten Prüfkörpern, die gegenüber den einfacher herzustellenden Pulverpresslingen zahlreiche analytische Vorteile aufweisen. So führt die hohe Verdünnung zu einer Homogenisierung der Untersuchungsobjekte und einer Angleichung der Matrixeffekte, andererseits aber auch zu kleineren Messraten und damit zu höheren Nachweisgrenzen. Diese sind für die relevanten chemischen Hauptkomponenten aber hinreichend gut. Bei Spurenelementen hingegen kann sich eine hohe Verdünnung störend bemerkbar machen. Die über die Messstatistik ermittelte Nachweisgrenze von Kobalt (Co) liegt unter Routineanalysebedingungen bei 5 ppm (0.0005 Gew.-%) für den 3-sigma-Vertrauensbereich (vgl. auch Abb. 74; mit Eintragung des messstatistischen Vertrauensbereiches). Ein Nachteil von Schmelzlingen ist der unkontrollierbare Verlust einzelner Elemente wie Fluor (F), Chlor (Cl) und Schwefel (S) während der Präparateherstellung. Diese Elemente sollten allenfalls mittels ED-XFA an unkalzinierten Pulverpresslingen gemessen werden. Für kleinste Probenmengen von 2 mg und darunter steht ein spezielles Präparationsverfahren für feines Pulver auf «Criminal Tape» für ED-XFA zur Verfügung.

Grundsätzlich können Normschmelzlinge in einem energiedispersiven (ED-XFA) oder in einem wellenlängendispersiven Spektrometer (WD-XFA) analysiert werden. Im vorliegenden Fall gelangte ein SRS-3400 Spektrometer von Siemens-Bruker-AXS zur Anwendung, für das eine ausgefeilte Analyseroutine für silikatische Materialien bereits erstellt worden war (Methode st-less-HR-P+Scan). Neben den zu erwartenden 12 chemischen Haupt- und Nebenkomponten  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$ , Cl wurden 23 Spurenelemente zur Kontrolle mitgemessen. Sinn dieser Zusatzinformationen ist die Klärung der Frage, ob unerwartete Elemente in einzelnen Fällen als Neben- oder Hauptkomponenten auftreten.

Dies war in der Tat zum Beispiel bei Antimon (Sb) oder Blei (Pb) und auch Kobalt (Co) zu beobachten (vgl. Abb. 74a). Als exemplarisches Beispiel diene das Element Kobalt, dessen färbende Wirkung (blau) bekannt ist. Werden die Messzahlen von Co K $\alpha$  (als net counts) den ermittelten Co-Konzentrationen (als ppm) gegenübergestellt, zeigt sich zwischen 50 und 600 ppm Co (0.005 bis 0.06 Gew.-%) eine lineare Korrelation; bei den Projektionspunkten mit Co > 200 ppm handelt es sich ganz überwiegend um blaue Gläser. Das unvermittelte Ende der Geraden bei rund 50 bis 70 ppm

hängt mit der Funktion statistischer Filter der Röntgenfluoreszenzanalyse zusammen, die bei Kobalt Impulsraten  $< 40$  cps gleich 0 setzt. Tatsächlich ist die faktische Nachweisgrenze aber etwas tiefer, wenn wir die Statistik der gefundenen Nettoimpulsraten berücksichtigen: 40 cps entsprechen faktisch 1200 Nettoimpulsen = 50 ppm Co, weil auf der Linie jeweils 30 Sekunden gemessen werden. Wenn als geringste, noch zuverlässige Nettoimpulszahl 100 angenommen wird – wo sich bei einer 3-sigma-Statistik eine Streuung von 30 % ergibt, die gerade noch als akzeptabel gelten kann –, so liegt die berechnete Nachweisgrenze bei 5 ppm. Wird die Korrelation von Zählrate und Konzentration offline ermittelt und die gefundene Geradengleichung  $y = mx$  auf alle Zählraten angewendet, so zeigt sich, dass die Mehrzahl der analysierten Gläser einen Kobaltgehalt zwischen 20 und 100 ppm aufweist (Abb. 74b), was aus Abb. 74a wegen der erwähnten Statistikfilter nicht ersichtlich ist.

Gläser mit erhöhtem Kobaltgehalt über 100 ppm sind ganz überwiegend blau und enthalten gleichzeitig offenbar auch mehr Nickel. Hingegen sind erhöhte Nickelgehalte nicht an erhöhte Kobaltgehalte gebunden; erhöhte Nickelgehalte von 100 bis 150 ppm Ni sind auch im Keramikmaterial zu beobachten (Glashäfen, Ofenwand). Bei dem für die Blaufärbung verwendeten Additiv dürfte es sich um ein Kobalt-Nickel-Eisenerz handeln.

Blaue Materialien mit erhöhtem Kobalt-Nickel-Gehalt sind nicht nur Gläser, sondern auch Produktionsabfälle wie Pfeifenabschläge, Glastropfen und Glashäfen (Abb. 74c–d).

Das Element Kupfer (Cu) kann als chemische Haupt- oder Nebenkomponekte mittels XFA problemlos erfasst werden, als Spurenelement verursacht es aber Schwierigkeiten, weil das Spektrum der anregenden Rhodiumröhre im Verlauf ihres Alterungsprozesses einen steigenden Kupferrestgehalt vortäuscht; von einer Auswertung der Cu-Ergebnisse im Spurenbereich sollte deshalb abgesehen werden. Kupfer als Neben- oder Hauptkomponente scheint im vorliegenden Material nicht vorhanden zu sein.

Die theoretischen Aspekte der XFA sind von Potts<sup>298</sup> eingehend beschrieben worden; über die *Performance* der verwendeten, sogenannten standardlosen Analytik im Speziellen gibt Stern<sup>299</sup> Auskunft.

#### 4.2.2.2 Thermische Analytik (DTA-TGA, CA)

Neben den erwähnten, für die Glasanalyse relevanten Methoden gelangten bei der Analyse von Rohmaterialien – Sande, Aschen – zwei weitere Techniken zur Anwendung, Differentialthermogravimetrie (DTA-TGA) und Verbrennungsanalyse (*Combustion Analysis*, CA).

DTA-TGA gibt Informationen zum Entwässerungs- und Decarbonisierungsverhalten von Pflanzenaschen in Funktion der Temperatur (Intervall 30 bis 1400 °C); sie kann auch Informationen zum Schmelzverhalten von Aschen liefern. Die Verbrennungsanalyse quantifiziert mittels Infrarotzellen nicht nur den Kohlenstoff-, Carbonat- ( $\text{CO}_2$ ) und Wassergehalt einer Pulverprobe, sondern gibt auch Auskunft über die Reaktionstemperatur im Bereich von 30 bis 1150 °C.

#### 4.2.2.3 Röntgendiffraktometrie (XRD)

In manchen Fällen genügt die chemische Information allein nicht, um zum Beispiel einen technologischen Prozess zu klären. In Kap. 4.1.3 ist gezeigt worden, dass der chemische Nachweis von Kalium in Pflanzenasche noch nichts Direktes über die Anwesenheit des Netzwerkwandlers Kaliumcarbonat sagt. Liegt neben Kalium als Carbonat (Pottasche) noch Kalium als Sulfat (Arcanit; Galle) und als Chlorid (Sylvin) vor, so braucht es zusätzliche mineralogische Informationen über die Präsenz oder Abwesenheit solcher Mineralien in der Asche. Da Pflanzenasche sehr feinkörnig beschaffen ist, versagen die Methoden der klassischen optischen Mikroskopie. Methode der Wahl ist dann die Röntgenbeugungsanalyse, meist als Röntgendiffraktometrie (XRD, Zählrohrgoniometrie/Röntgenbeugung).

Im Regelfall werden einige 100 mg in einen Probenhalter gegeben und diffraktometriert. Mittels der gefundenen Netzebenenabstände ( $d$ -Werte) und deren Intensität (relative Intensität  $I_{\text{gemessen}} / I_{\text{maximal}}$ ) kann eine online geschaltete Datenbank (JCPDS) Mineralien identifizieren. Im günstigen Fall gilt dies nicht nur für Gemenge von 2 bis 3 gleichzeitig anwesenden Mineralspezies, sondern auch für bis zu 6 Spezies. Die XRD ist in der Lage, mineralische Hauptkomponenten

zu identifizieren – oder das Fehlen bestimmter Komponenten nachzuweisen –, aber sie eignet sich nicht zum Nachweis von Mineralspuren im Gemisch.

Die XRD setzt trotz gut entwickelter Computerunterstützung eine Erfahrung in der Beurteilung von Röntgenbeugungsbildern voraus. Obwohl in den Materialwissenschaften die Röntgendiffraktometrie routinemässig eingesetzt wird<sup>300</sup>, wird sie in der Untersuchung der Holzasche wenig bis kaum angewendet (vgl. dazu auch Kap. 4.1.3).

Chemische Analysen archäologischer Objekte (z. B. Glas, Keramik, Metall) dienen zunächst der korrekten Materialansprache – ein weisser Stein soll nicht als «Marmor» oder «Kalkstein» angesprochen werden, wenn es sich ums Gips handelt; eine Münze nicht als Silber, wenn die Legierung kaum Silber enthält. Bei komplexeren Fragen, etwa der Herkunft von Keramik oder dem Herstellungsprozess von Glas, genügt oft die exemplarische Einzelanalyse nicht, weil es auch um natürliche Variationsbreiten geht und die Verschiedenheit oder Ähnlichkeit mutmasslicher Gruppen mit hinreichend grossen Populationen belegt sein muss (s. auch Kap. 4.1.1). Dies führt notwendigerweise zu grossen Datensätzen, die mittels statistischer Methoden vielfältig ausgewertet werden (s. Kap. 4.2.3). Ergänzend ist hier beizufügen, dass aufgrund prinzipieller Überlegungen die Falsifizierung eines angenommenen Unterschieds mit grösserer Sicherheit vorgenommen werden kann als dessen Verifizierung, solange keine abschliessende Liste aller Kriterien besteht.

### 4.2.3 Statistische Auswertung der chemischen Analysen

Yvonne Gerber

Die Auswertung der chemischen Analysen erfolgt mit einer Reihe von statistischen Untersuchungen. Die chemischen Analysewerte mit WD-XFA sind für die Haupt- und Nebenkomponten als Gewichtsprozente und für die Spurenelemente als ppm ausgegeben (s. Annex 2). Die chemischen Komponenten des Glases variieren nicht unabhängig von-

einander. Die Unabhängigkeit der Variablen wurde jedoch bisher als Prämisse konventioneller statistischer Untersuchungen behandelt. Die relativen Anteile (Gew.-% bzw. ppm) müssen demnach zweckmässig transformiert werden. Vorgehensweise und Hintergrund sind im Annex 1 «Précis d'analyse statistique» erläutert.

#### 4.2.3.1 Chemische Haupt- und Nebenkomponten

Die statistische Auswertung erfolgt zunächst für die chemischen Haupt- und Nebenkomponten  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  und  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Natrium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), hier als Nebenkompont, wird in Abb. 75 noch berücksichtigt, danach aber ausgeschlossen, da zu viele der  $\text{Na}_2\text{O}$ -Werte im analysierten Glas unter der Nachweisgrenze liegen. Ebenfalls ausgeschlossen werden die Proben Fnr. 78163-015 und 78251-111, ein blaues Fläschchen und ein Pfeifenabschlag blauer Farbe, deren Analysewerte einige Unregelmässigkeiten aufweisen und die sich bei den statistischen Auswertungen immer wieder als Ausreisser erwiesen.

#### Hohl- und Flachglas ( $n = 122$ )

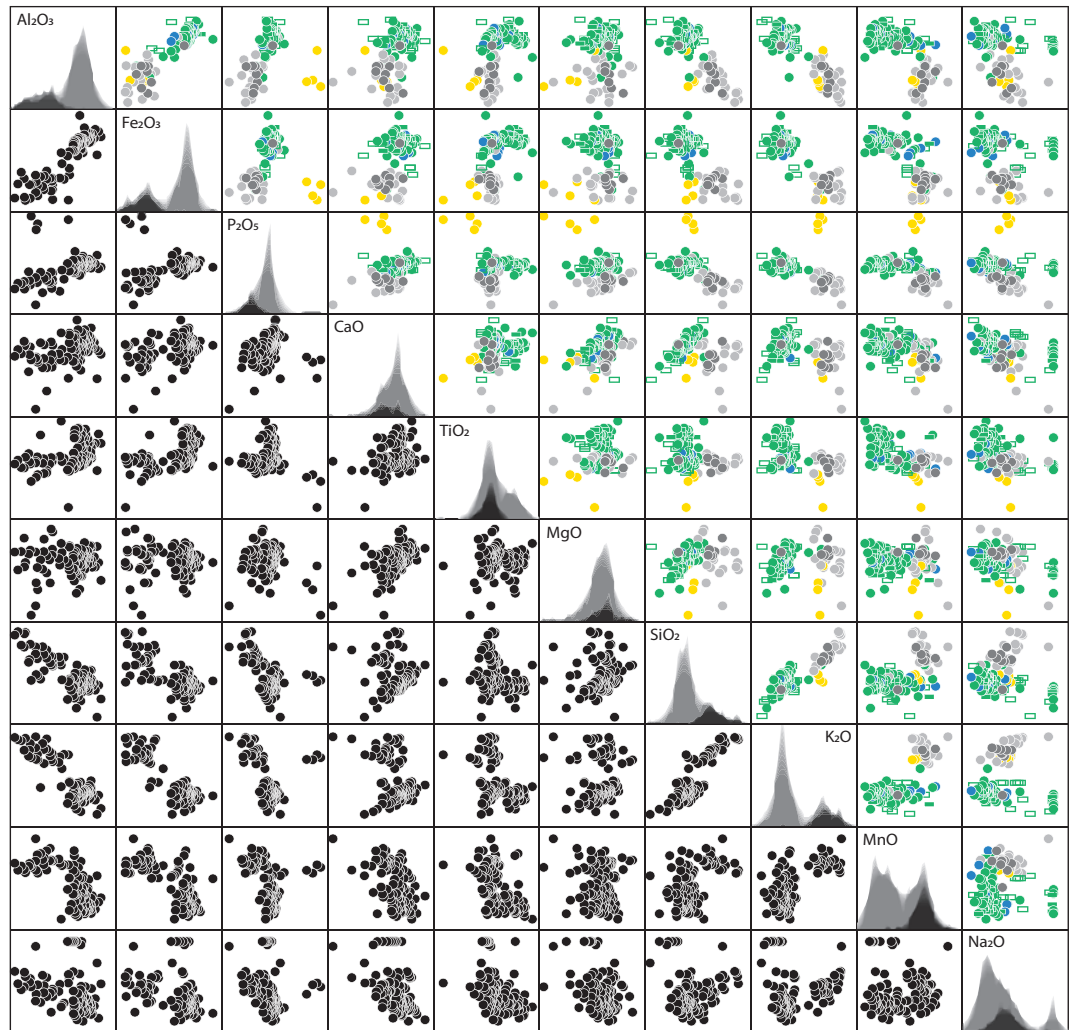
Die nachfolgenden statistischen Auswertungen wie Multivariate Analyse (MVA), [statistische] Hauptkomponentenanalyse (PCA) und  $k$ -means-Algorithmus ( $k$ -means) (s. auch ③.A.3 ③.A.4 ④.A) werten zunächst nur die gegebenen chemischen Analyseergebnisse aus. Konkret: Die Glasproben werden im ersten Schritt allein aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung beurteilt. Nichtchemische, zum Beispiel kategorielle Informationen sind in der ersten statistischen Beurteilung nicht berücksichtigt. Um eine Beeinflussung durch exogene Variablen auszuschliessen, arbeitet die Statistik zunächst «farbenblind».

Zusätzliche Informationen, die wir in Bezug auf die Statistik *exogen* nennen, sind:

1. Farbkategorien: grünes, blaues oder farbloses Glas?
2. Glaskategorien:
  - Gefässkategorie: Hohl- oder Flachglas?
  - Gefässtyp: Kelchglas, Becher, Flasche?
  - Zwischen-, Abfall- oder Endprodukt?

300 Zur Methode s. auch Krischner/Koppelhuber-Bitschnau 1994.

Abb. 75: *scatterplot matrix* mit den ausgewählten chemischen Haupt- und Nebenkomponten:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ . In der Diagonalen «*shadowgrams*» (Histogramme der Dichtefunktion der jeweiligen Elemente, *density plots*). Die dunklere Schattierung im *shadowgram* markiert die Verteilung des farblosen und filigranverzierten Glases.



Die exogenen Informationen sind durch Symbole, Farben und Kürzel wie in Abb. 72 (Kap. 4.2.1) angegeben und stehen immer für rein *exogene kategorische Variablen*. Diese Informationen repräsentieren den Kenntnisstand des Bearbeiters Christophe Gerber vom ADB, der die typologische und kategorische Bearbeitung der Glasgefäße und Glasfragmente vornahm (s. chap. 3.3). Als diese Kategorien bestimmt wurden, lagen weder chemische Analysen noch statistische Auswertungen vor, diese haben also in keiner Weise die Kategorisierung beeinflussen können. Vielmehr sollen nun die typologischen und kategorischen Variablen des Archäologen unter anderem mit den chemischen Analyseresultaten verglichen und validiert werden. Dazu dienen statistische Verfahren wie Diskriminanzanalyse (DA)

(☞ ④.B) oder Korrespondenzanalyse (CA) (☞ ④.C). Die statistischen Verfahren sind komplementär zueinander.

Die Symbole, Farben und Kürzel von Abb. 72 sind nachfolgend allen Abbildungen (Ausnahme: Abb. 78–79, 90, 103, 107, 111) unterlegt. Alle Analysedaten, die für die unten stehenden statistischen und von Yvonne Gerber gezeichneten Auswertungen verwendet worden sind, sind, wenn in der Legende nicht anders erwähnt, *clr*-transformiert (☞ ②.B.2). Die Begründung dafür ist im Annex 1 ausgeführt. Die Werte auf den Variablenskalen sind in der Regel keine Gewichtsprozente (Gew.%), sondern relative Anteile der jeweiligen *Aitchison-composition*. Wo sinnvoll, ist das jeweils entsprechende Gew.-%-Intervall zur Orientierung angegeben.

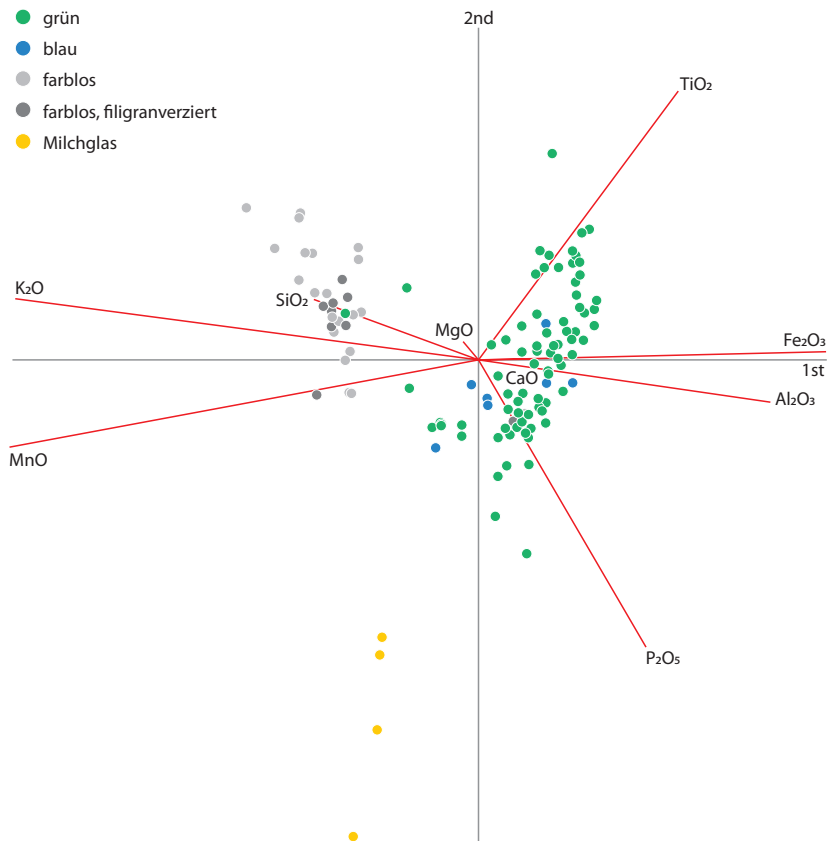


### Multivariate Analyse (MVA) (Abb. 75)

#### ☞ ③.A.3

Die untere *triangular plot matrix* (ohne farbige Symbole) zeigt die Relationen zwischen den chemischen Variablen ohne exogene Information, die obere *triangular plot matrix* (farbig) hingegen bezieht Informationen über Farbe und Form ein. Die Matrix ist in der Reihenfolge abnehmender Kovarianz zwischen den Variablen angeordnet. Einzig  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  und  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$  zeigen eine simple lineare, positive Korrelation. Die anderen Relationen lassen das Öfteren zwei Anhäufungen (z.B.  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{MnO}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zu  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  zu allen anderen, und so weiter) erkennen. Diese Anhäufungen sind oft jeweils deckungsgleich mit der Gruppe der bunten Hohl- und Flachgläser und mit der Gruppe der farblosen Hohlgläser. Auffällig ist, dass sich in mehreren Relationen vier Glasgefäßfragmente, die als Milchglas etikettiert worden sind, deutlich von den zwei anderen Anhäufungen absetzen, insbesondere in denjenigen von Phosphat ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) zu allen anderen chemischen Haupt- und NebenkompONENTEN. Diese vier Fragmente haben vor allem einen wesentlich höheren  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalt. Die *density plots* von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$  zeigen eine bimodale Verteilung, offensichtlich durch die bunten und farblosen Gläser bedingt.

Die *plot matrix* verdeutlicht, dass die chemischen Komponenten in ihrer Gesamtheit nicht linear miteinander korreliert sind. Die weitere statistische Bewertung erfordert daher Methoden, die nicht auf linearen Abhängigkeiten basieren.



### Hauptkomponentenanalyse (PCA) (Abb. 76–77)

#### ☞ ②.B.4 ☞ ②.B.5 ☞ ③.A.4

Entlang der Hauptkomponente 1 (x-Achse) unterscheiden sich zwei Gruppen durch Aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Eisen ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), gegenläufig zu Kalium ( $\text{K}_2\text{O}$ ) und Mangan ( $\text{MnO}$ ). Entlang der Hauptkomponente 2 (y-Achse) unterscheiden sich aufgrund höherer  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Proportionen nur die vier Milchgläser vom *cluster*-Schwerpunkt der übrigen Daten. Die aus der Hauptkomponentenanalyse ermittelten Gruppen sind deckungsgleich mit den

Abb. 76: biplot von Hauptkomponenten 1 und 2 (s. auch Abb. 77) nach PCA (Principal Component Analysis) mit den gleichen chemischen Haupt- und NebenkompONENTEN wie in Abb. 75, mit Ausnahme von  $\text{Na}_2\text{O}$ ; Symbole für Flachglas hier nicht extra ausgewiesen; Komponenten in Aitchison-Geometrie *clr*-transformiert. Punkte: *scores* der Hauptkomponenten 1, 2. Vektorpfeile: *loadings* (relative Anteile der chemischen Elemente an der Bildung der Hauptkomponenten 1, 2).

Principal Components:										Cum. Prop.
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	MgO	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	MnO	
PC1	0.3283	0.0612	0.4571	-0.5210	-0.0173	0.1884	-0.1852	0.2247	-0.5362	0.6765
PC2	-0.1019	0.0017	0.0197	0.1475	0.0440	-0.6924	0.1457	0.6480	-0.2122	0.8238
PC3	0.2687	-0.0706	0.3017	-0.3964	0.0088	-0.4627	-0.1729	-0.1215	0.6448	0.9057
PC4	-0.1967	-0.2340	-0.1891	-0.1861	-0.3253	0.3850	-0.2428	0.6250	0.3639	0.9539
PC5	0.0888	-0.4373	0.5152	0.4495	-0.5642	0.0025	0.0736	-0.0907	-0.0375	0.9778
PC6	-0.7496	0.3664	0.4560	-0.1930	-0.1093	0.0286	0.1873	-0.0666	0.0802	0.9917
PC7	0.2985	0.4647	-0.2776	-0.1715	-0.6494	-0.0660	0.4023	-0.0180	0.0170	0.9980
PC8	-0.0312	-0.5329	-0.0472	-0.3677	0.1698	0.0803	0.7363	-0.0091	0.0017	1.0000

Abb. 77: Hauptkomponenten (*principal components*) aufgrund von Kovarianzen; PCA (Principal Components Analysis) in Aitchison-Geometrie.

exogenen Kategorien bezüglich der Information über Farbe respektive Farblosigkeit der Gläser (vgl. Abb. 75), das heisst sie entsprechen exakt den *a priori* gebildeten Farbkategorien.

### *k*-means cluster-Analyse (Abb. 78–79)

#### ④.A

Entlang Hauptkomponente 1 zeichnen sich deutlich zwei *cluster* ab. Höhere Kalium- ( $K_2O$ ) und Siliciumanteile ( $SiO_2$ ) der Proben

im (linken) *cluster* 3 (orange markiert) zu höheren Anteilen der chemischen Hauptkomponenten Aluminium ( $Al_2O_3$ ), Eisen ( $Fe_2O_3$ ), Titan ( $TiO_2$ ) der Proben im (rechten) *cluster* 1 (rot markiert). Nur vier Punkte bilden ein drittes *cluster* 2 (hellblau markiert) und weichen entlang Hauptkomponente 2 (y-Achse) deutlich von den zwei anderen *cluster*-Bildungen ab; dies entspricht einem höheren  $P_2O_5$ -Anteil (s. auch Abb. 79).

### Diskriminanzanalyse

#### ④.B

In den vorherigen Analysen wurden Gruppenbildungen nur aufgrund ihrer chemischen Relationen herausgearbeitet. Exogene Informationen waren für die *cluster*-Bildung nicht massgebend.

In den folgenden Auswertungen werden exogene Informationen (Farb- und/oder Glas-kategorie/Kategoriezugehörigkeit) den chemischen Variablen und/oder *clusters* gegenübergestellt (Abb. 80).

Werden die Farbkategorien den chemischen Variablen gegenübergestellt, klumpen

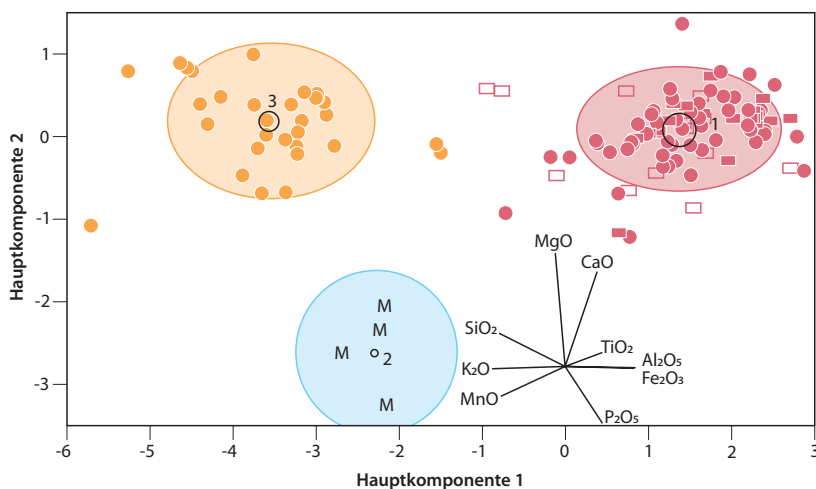


Abb. 78: biplot der *k*-means cluster-Analyse, Variablen standardisiert,  $K = 3$ . Farbkodierung orange/rot/hellblau nur zur *cluster*-Identifikation, nicht exogenen Farbkategorien entsprechend. Kreisflächen proportional zur *cluster*-Grösse (*cluster* 1:  $n = 88$ , *cluster* 2:  $n = 30$ , *cluster* 3:  $n = 4$ ). Ellipsen bezeichnen die 95%-Konfidenzintervalle der *cluster*-Mittelpunkte (wenig belegte, weit streuende *cluster* haben *ipso facto* grössere Konfidenzintervalle als grosse, dichte *cluster*).

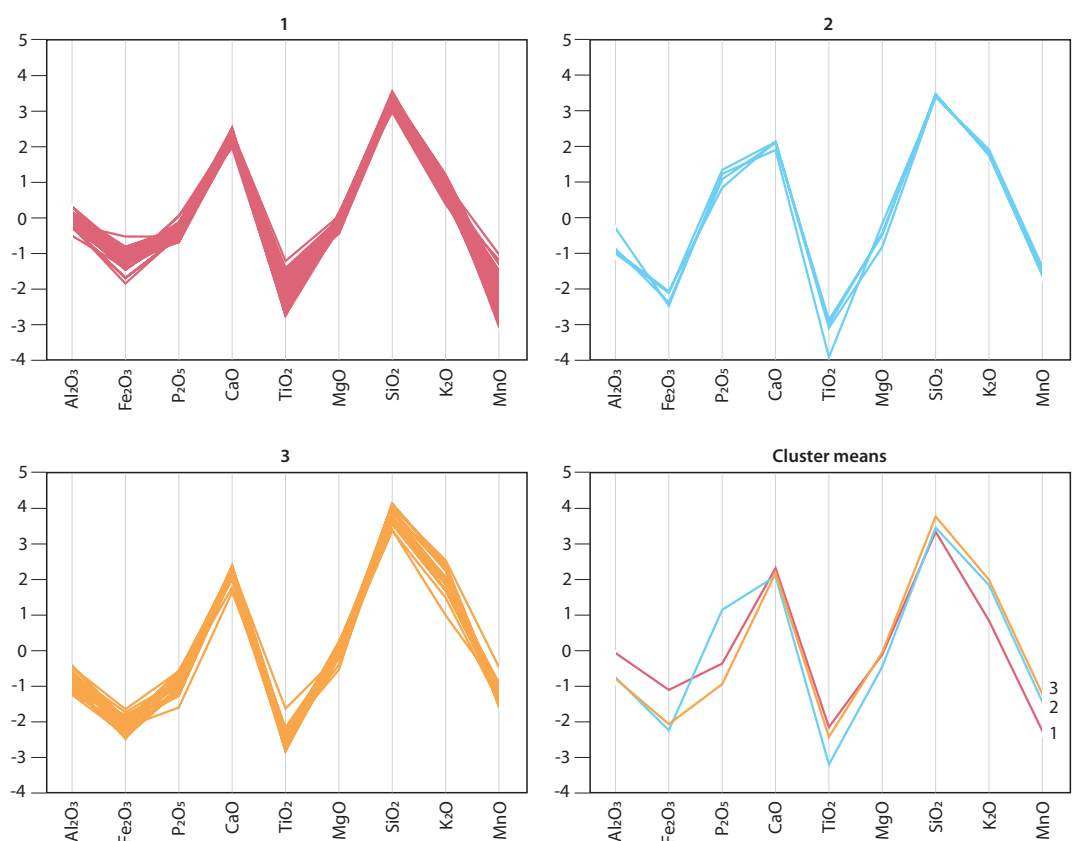


Abb. 79: Die standardisierten chemischen Komponenten, in parallelen Koordinaten gezeichnet, verdeutlichen die Divergenzen von *cluster* 1, 2 und 3. Reihenfolge der chemischen Haupt- und Nebenkompenten wie in Abb. 75.

die Daten um drei Schwerpunkte: eine bunte, eine farblose und eine milchige Glasgruppe.

In ihrer Streuung der Analysewerte sind grüne und blaue Gläser aufgrund der chemischen Haupt- und NebenkompONENTEN praktisch deckungsgleich, sie differieren aber signifikant von den Klassen des farblosen und opakweissen Glases. Die Diskriminanzanalyse der chemischen Komponenten nach fünf Farbkategorien weist circa 34 % als «misclassified» (42 Proben [von Hohl- und Flachglas:  $n = 122$ ]) aus. Dies darf nicht verwundern, denn chemisch sind die Gruppen der grünen und blauen Gläser praktisch gleich (s. auch Kap. 4.2.3.1, s.v. Erste Schlussfolgerungen; Kap. 4.2.3.2, s.v. Blaues Hohlglas). So können mittels DA drei der sieben blauen Gläser chemisch nicht von den grünen Gläsern, 26 von den 81 grünen nicht von den blauen Gläsern unterschieden werden. Gleiches gilt für die farblosen Gläser, sechs der farblosen Gläser ohne Dekor (F) werden den filigranverzierten Gläsern zugewiesen.

Fasst man die grünen und blauen Gläser und die farblosen und filigranverzierten Gläser

jeweils zu einer Gruppe zusammen (Abb. 81):  $G \cup B \Rightarrow Bunt$ ,  $F \cup Fi \Rightarrow FF$ ,  $M \Rightarrow M$ , dann werden nur noch 2.5 % als falsch klassifiziert (3 von [Hohl- und Flachglas:  $n = 122$ ]) und die Gruppen der bunten Hohl- und Flachgläser und der farblosen Hohlgläser haben jeweils nur noch eine bzw. zwei Proben in der anderen chemischen Gruppe. Diese falsch Klassifizierten sind auch in anderen Abbildungen ersichtlich, zum Beispiel Abb. 76, wo ein grünes Glas im Bereich der kalium- und manganreichen Gruppe plottet.

### Korrespondenzanalyse

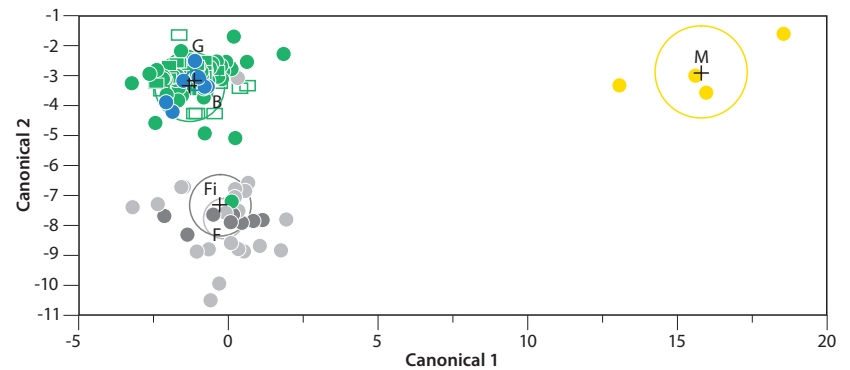
#### ④.C

Die Korrespondenzanalyse ermittelt den Zusammenhang zwischen *a-priori*-Kategorien, hier die Farbkategorien, und *a-posteriori*-Klassen, hier die *k-means-cluster* gemäss chemischer Zusammensetzung. Visuell zeigt ein Mosaikplot die Gesamtstruktur der kategoriellen Kontingenz für die Gesamtheit der Gruppen. *Kontingenz* bedeutet dabei das kreuzweise gemeinsame Auftreten von Merkmalen, nach Frequenz aufgeschlüsselt. Im Mosaikplot

Number Misclassified	42
Percent Misclassified	34.43
-2LogLikelihood	202.7

#### Counts: Actual Rows by Predicted Columns

	B	F	Fi	M	G
B	4	0	0	0	3
F	0	14	6	0	1
Fi	1	3	5	0	0
M	0	0	0	4	0
G	26	1	1	0	53



Eigenvalue	Percent	Cum Percent	Canonical Corr
9.37438082	69.9130	69.9130	0.95058335
3.91574869	29.2032	99.1162	0.89250893
0.07781249	0.5803	99.6965	0.26869095
0.04068996	0.3035	100.0000	0.19773473

Test	Value	Approx. F	NumDF	DenDF	Prob>F
Wilks' Lambda	0.0174817	25.4029	32	407.26	<.0001*
Pillai's Trace	1.8114747	11.6915	32	452	<.0001*
Hotelling-Lawley	13.408632	45.5830	32	277.18	<.0001*

#### Standardized Scoring Coefficients

	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO
Canon 1	-0.542612	1.2646619	-0.030662	-0.005267	-0.635059	-0.144913	0.8155329	-0.021313
Canon 2	-0.21467	0.080271	0.2999795	-0.366321	-0.501816	-0.55032	-0.43214	-0.541773

Abb. 80: *canonical correlation* einer linearen Diskriminanzanalyse (DA), Klassenzugehörigkeit aufgrund der exogenen Farbkategorien. Kreise entsprechen 95%-Konfidenzintervall des Gruppenmittelwerts. *Actual rows by predicted columns*: Abweichungen der Diskriminanzklassifikation von der *a-priori*- (exogenen) Kategorisierung.

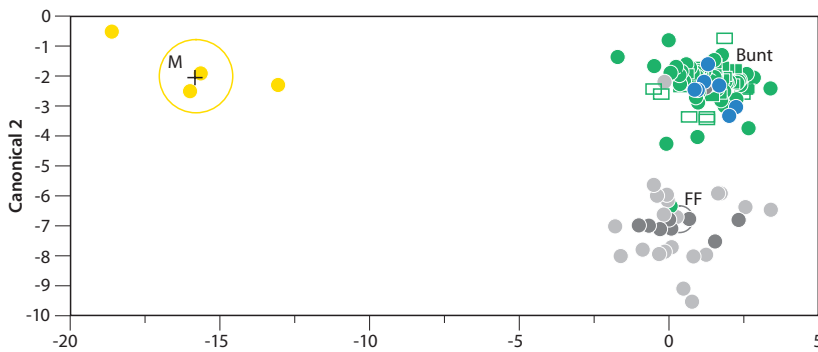


Abb. 81: DA wie Abb. 80, aber nur mit 3 Gruppen.

Number Misclassified	3
Percent Misclassified	2.459
-2LogLikelihood	58.38

#### Counts: Actual Rows by Predicted Columns

	Bunt	M	FF
Bunt	87	0	1
M	0	4	0
FF	2	0	28

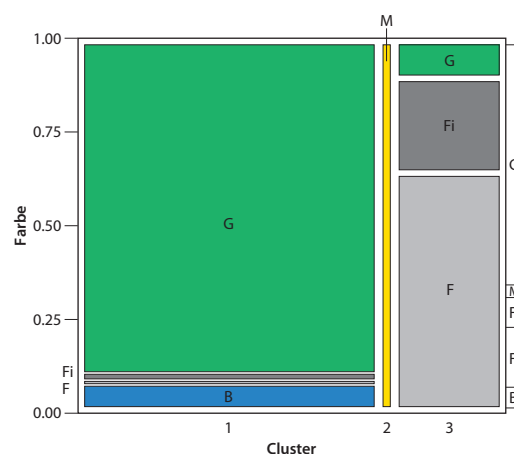
Eigenvalue	Percent	Cum Percent	Canonical Corr
9.34775136	70.7931	70.7931	0.95045286
3.85657769	29.2069	100.0000	0.89111935

Test	Value	Approx. F	NumDF	DenDF	Prob>F
Wilks' Lambda	0.0198987	85.2467	16	224	<.0001*
Pillai's Trace	1.6974543	79.2493	16	226	<.0001*
Hotelling-Lawley	13.204329	91.8014	16	179.72	<.0001*

#### Standardized Scoring Coefficients

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O
Canon 1	-0.001761	0.5311146	-1.286011	0.0291093	-0.00115	0.6312234	0.1483675	-0.827567
Canon 2	0.2833392	0.0813138	0.3109598	0.4713194	0.0744307	-0.364502	-0.364728	-0.132559

Abb.82: mosaic plot und zugehörige Kontingenztafel; k-means clusters (a-posteriori-Kategorien) werden den exogenen Farbinformationen (a-priori-Kategorien) gegenübergestellt.



#### Cluster by Color

Cluster	B	F	Fi	M	G	Total
1	7	1	1	0	78	87
2	0	0	0	4	0	4
3	0	20	8	0	3	31
Total	7	21	9	4	81	122

N	DF	-LogLikelihood	R <sup>2</sup> (U)
122	8	65.566710	0.5152

Test	χ <sup>2</sup>	Prob>χ <sup>2</sup>
Likelihood Ratio	131.133	<.0001
Pearson	218.751	<.0001

entsprechen die Flächen den relativen Häufigkeiten für jede Kombination von Merkmalausprägungen. Zudem sind relative Unabhängigkeit oder Interdependenz zweier oder mehrerer Variablen ersichtlich (Abb. 82):

Cluster 1 (linke Kolonne) besteht aus den grünen und den wenigen blauen Gläsern, nur zwei farblose Gläser werden ebenfalls zu cluster 1 gerechnet. Cluster 3 (Kolonne ganz rechts) setzt sich hauptsächlich aus dem farblosen Hohlglas zusammen, wenige grüne Gläser (n = 3) werden gemäss k-means-Analyse ebenfalls zu cluster 3 gerechnet. Die vier Milchgläser bilden ein eigenes cluster (2).

#### Erste Schlussfolgerungen

Die durch PCA und k-means eruierten drei cluster sind mit den Gruppen der bunten, farblosen bzw. opakweissen Gläsern praktisch deckungsgleich. Dies wird durch die DA bestätigt. Der mosaic plot veranschaulicht diese Korrespondenz.

Abb. 79 zeigt die Unterschiede in den chemischen Haupt- und Nebenkomponten zusammenfassend auf: Cluster 1, alle bunten Hohl- und grünstichigen Flachgläser enthaltend, zeigt auf, dass diese Gruppe, im



Holzaschenglas, Waldglas, K-Ca-2	<i>k</i> -means <i>cluster</i> 1	buntes Hohl- und Flachglas
Pottaschenglas, K-Ca-3	<i>k</i> -means <i>cluster</i> 2 und 3	farbloses Hohlglas, Milchglas

Abb. 83: Zwischenstand, aufgrund der Abb. 78–79 (*k*-means *cluster*) und Abb. 82 (*mosaic plot*).

Glastyp	Flussmittel	Chemische Haupt- und NebenkompONENTEN der Holzasche für die Glasherstellung (Flussmittel)	
Holzaschenglas, K-Ca-2, Waldglas	Holzasche, unprozessiert	enthält <i>alles</i> : (SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnO, MgO, CaO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, TiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Rückstand: es gibt keinen Rückstand
Pottaschenglas, K-Ca-3	Holzaschen-Extrakt	Extrakt enthält: K <sub>2</sub> O, (Na <sub>2</sub> O) [Cl, SO <sub>3</sub> ; vgl. Kap. 4.1.2.2; 4.1.3]	Rückstand enthält, bzw. K-Ca-3 ist arm an: (SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnO, MgO, CaO, TiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>

Abb. 84: Zusammensetzung des Flussmittels für K-Ca-2- (Holzasche, unprozessiert) und K-Ca-3-Glas (Pottasche). SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sind Bestandteile sowohl des Netzwerkbildners (Sand) wie auch des Netzwerkwandlers (Holz-/Baumasche). Im Fall von Court, Pâturage de l'Envers dürfte das Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mehrheitlich von der Holzasche stammen, denn die verwendete Huppererde ist weitgehend aluminiumfrei (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < 2–5 Gew.-%).

Vergleich zu *cluster* 3, einen höheren Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>- und TiO<sub>2</sub>-Gehalt umfasst. Hingegen ist der K<sub>2</sub>O- und MnO-Anteil deutlich geringer. *Cluster* 3, die farblosen Hohlgläser umfassend, weisen dementsprechend einen höheren K<sub>2</sub>O- und MnO-Gehalt und einen geringeren P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Anteil auf. Die opakweißen Gläser (*cluster* 2) entsprechen mehrheitlich *cluster* 3, mit Ausnahme des P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Anteils, der markant höher ist als die Phosphatanteile von *cluster* 1 und 3.

Die durch die statistischen Auswertungen eruierten Gruppen sollen hier ein erstes Mal folgendermassen benannt werden (s. auch Abb. 83):

Die erste Gruppe (*cluster* 1) repräsentiert ein homogenes Holzaschenglas – K-Ca-2 (s. Abb. 69) – bzw. Waldglas, wie es in der Literatur oft auch genannt wird. Die zweite Hauptgruppe (*cluster* 3) bezeichnen wir als Pottaschenglas – K-Ca-3 (s. Abb. 69) –, hergestellt aus Holzaschenextrakt, sprich: Pottasche (Kaliumcarbonat, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), Quarzsand und Kalk als Stabilisator. Eine kleine, ausgewiesene dritte Gruppe (in Abb. 78–81 *cluster* 2; n = 4) kann ebenfalls dem Pottaschenglas zugerechnet werden.

Dem chemischen Unterschied liegt ein verschiedenartiger technologischer Prozess in der Gewinnung und Verarbeitung des Flussmittels zugrunde. Pottasche als Flussmittel bewirkt annähernd farbloses Glas (Abb. 84):

Das Pottaschenglas enthält wegen des Extraktionsprozesses, dem Auswaschen der Baum-/Holzasche, wenig färbende Komponenten (s. auch Abb. 84). Die leicht löslichen Kalisalze lassen sich von den schwerer löslichen eisen- (Fe), magnesium- (Mg), calcium- (Ca) und phosphorhaltigen (P) Komponenten und Silikaten leicht abtrennen (s. Kap. 4.1.2.2, s. v. Kaliglas). Potentiell färbende Bestandteile (wie Mg, Fe) verbleiben somit im Extraktionsrückstand (s. Kap. 4.1.3).

Die Herstellung von Pottasche ist ein zusätzlicher Aufwand in der Waldglas-Produktion gewesen. Schon mit zwei Komponenten lässt sich ein brauchbares, wenn auch buntes Glas (K-Ca-2-Glas) herstellen, aus dem diverse Gefässe geformt werden konnten und auch geformt wurden. Nahm man den zusätzlichen Aufwand auf sich, Holzasche auszuwaschen und die Holzaschenlauge zu dekantieren, dann muss sich dieser in irgendeiner Art und Weise gelohnt haben. Das daraus resultierende Produkt, ein farbloses Glas (K-Ca-3-Glas), mag wohl auf dem Markt gesucht und dessen Verkauf finanziell einträglich gewesen sein. Ein anderer Aspekt wird kaum angesprochen: der tiefere Schmelzpunkt (etwa 1100 bis 1150 °C; s. auch Kap. 4.3.3) der mit Pottasche hergestellten Glascharge. Die Glasmacher konnten somit Energie sparen und auch den Verschleiss von Glasöfen und Glashäfen minimieren.<sup>301</sup> Zugleich lag die Verarbeitungstemperatur

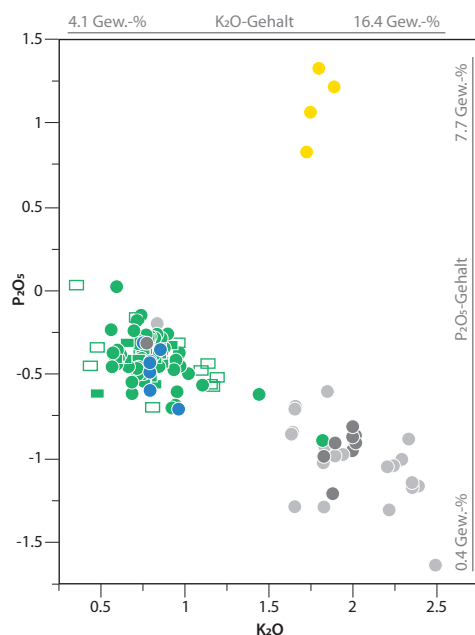
<sup>301</sup> S. auch andere Argumente in Čílová/Woitsch 2012, 377.

### Glasproben aus Court, Pâturage de l'Envers

Chemische HKn (ausgewählt), in Gew.-%	Fnr. 78151-158 farblos	Zusatz von Knochenasche (Handschin/Stern 1994)	resultierendes Glas (mit 10 % Knochenasche)	Fnr. 75489-021 Milchglas	Fnr. 77575-056 Milchglas
SiO <sub>2</sub>	71.50	0.35	64.40	62.90	60.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.40	(0.40)	0.36	0.81	0.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	(0.11)	0.10	0.18	0.24
MnO	0.24	–	0.22	0.38	0.44
MgO	1.02	0.01	0.90	1.20	0.88
CaO	12.50	56.30	16.90	16.00	16.80
K <sub>2</sub> O	12.80	–	11.50	11.50	12.40
TiO <sub>2</sub>	0.12	–	0.11	0.11	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.37	42.50	4.60	5.73	7.64

Abb. 85: Aus farblosem Glas von Court, Pâturage de l'Envers und 10 % Knochenasche berechnete Zusammensetzung, und Vergleich aus derselben Glashütte.

Abb. 86: *scatterplot* K<sub>2</sub>O/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Oben und seitlich eingeblendet die Gew.-%-Intervalle des K<sub>2</sub>O- bzw. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalts aller analysierten Hohl- und Flachgläser.



niedriger und das Glas war etwas länger formbar.<sup>302</sup> Ein spezieller Fall sind die Milchgläser. Sie bilden aufgrund der statistischen Auswertungen ( $n = 4$ ) zwar ein eigenes *cluster* (2), entsprechen aber mehrheitlich der chemischen Zusammensetzung der farblosen Gläser (*cluster* 3). Die farblosen Gläser, sogenannte Pottaschengläser, enthalten sehr wenig P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (< 1 Gew.-%)<sup>303</sup>, die Milchgläser hingegen zeigen einen markant höheren P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt (> 4.6 Gew.-%), der wohl nur durch Zugabe von Knochenasche erklärt werden kann.<sup>304</sup> Milchglas wird in der Literatur denn auch Beinoder Knochenaschenglas genannt und zeichnet sich durch weissliche Farbe bzw. Opazität aus, die durch Zusatz von Calciumphosphat (z. B. Knochenasche) zum Glasfluss verur-

sacht wurde. Bei hoher Temperatur löst sich der Glaszusatz vollkommen auf und man erhält eine homogene durchsichtige Schmelze; erst bei langsamer Abkühlung tritt eine milchige Trübung ein.<sup>305</sup>

Die Milchgläser scheinen in Court, Pâturage de l'Envers eine Gruppe für sich zu bilden, es sind nur 91 Glasscherben überliefert. Unter diesen können aufgrund der Ränder 36 Hohlglasindividuen (im Vergleich zu 5192 Glasindividuen insgesamt) ausgemacht werden. Einige der Scherben sind noch mit Emailfarbe (Farbspuren) bemalt. Christophe Gerber bezeichnet diese als mögliche Nachahmung von keramischer Fayence und sieht ihre Produktion eher ausserhalb von Court, Pâturage de l'Envers. Bleibt die Frage, warum sie denn überhaupt im Glasbruchmaterial von Court, Pâturage de l'Envers vorgefunden wurden.

Macht man eine Überschlagsrechnung und fügt einer farblosen Glascharge aus der Glasproduktion (s. Analysewerte einer farblosen Glasprobe) von Court, Pâturage de l'Envers 10 % Knochenasche bei, so resultiert eine mit den Milchgläsern vergleichbare, errechnete Zusammensetzung (Abb. 85): Die chemische Zusammensetzung widerspricht nicht der Annahme, dass das Milchglas auch ein lokales Produkt von Court, Pâturage de l'Envers sein könnte.

Entscheidende Kriterien für die Nomenklatur als Pottaschenglas (K-Ca-3), wie oben bereits erwähnt, sind der intentionell höhere K<sub>2</sub>O- (in Court, Pâturage de l'Envers zwischen 9 bis 16.4 Gew.-%) und der niedrigere P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt (< 1 Gew.-%)<sup>306</sup> (Abb. 86; s. dazu auch Abb. 87a).

302 Zum letzteren s. Maus/Jenisch 1997/98, 417.

303 Stern/Gerber 2009, 111–113; 116–117.

304 Stern/Gerber/Helmig 2002; zu Knochenasche allgemein s. Maus/Jenisch 1997/98, 373–374; 426–427.

305 Ullmann 1919, 247–248.

306 Stern/Gerber 2009.

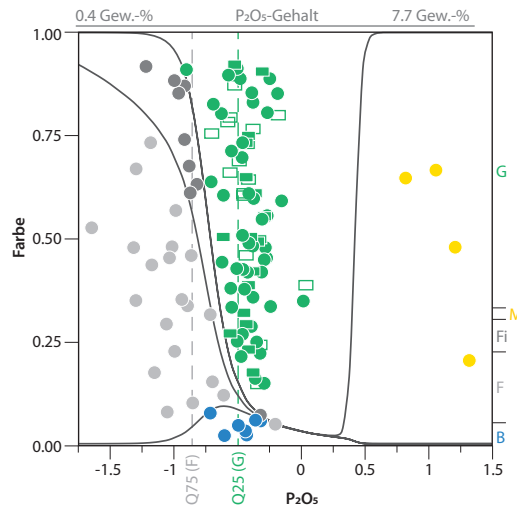
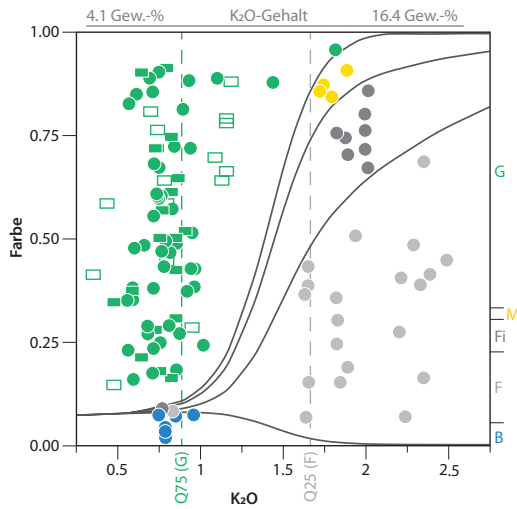


Abb. 87a: Logistische Regression von  $K_2O$  und  $P_2O_5$  versus Farbkategorien;  $K_2O$  und  $P_2O_5$  mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) (gestrichelte, vertikale Linien) der bunten und farblosen Gläser. Oben eingeblendet die Gew.-%-Intervalle des  $K_2O$ - bzw.  $P_2O_5$ -Gehalts aller analysierten Hohl- und Flachgläser.

Im Verlaufe der Redaktion dieser Arbeit hat sich ein ad-hoc-Exkurs zur Lesung des *logistic regression plot* (☞ ④.D) als notwendig erwiesen. Als Beispiel dient  $K_2O$  als Regressor der Farbkategorien (Abb. 87b):

Horizontal ist die  $K_2O$ -Konzentration (nach Aitchison entzerrt und *clr*-transformiert) abzulesen. Vertikal ist links der Wahrscheinlichkeitsbereich angezeigt (1.00 = 100 %). Für den  $K_2O$ -Wert von 1.5 sind die Schnittpunkte mit den Regressionskurven markiert. Horizontale Verbindungslinien zur vertikalen Wahrscheinlichkeitsachse definieren die farbkategoriellen Wahrscheinlichkeiten für diese Konzentration. Der vertikale Abstand zwischen den Regressionskurven der jeweiligen Kategorien definiert den entsprechenden Wahrscheinlichkeitswert, zu einem gegebenen  $X$ -Wert eine Zugehörigkeit zur Kategorie  $Y$  zu finden. Demnach beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Glas der Farbkategorie F (farblos) einen  $K_2O$ -Wert von 1.5 aufweist, knapp ein Drittel (hellgraues Feld); die komplementäre Wahrscheinlichkeit, dass ein grünes Glas (G) denselben  $K_2O$ -Wert aufweist, beträgt etwas weniger als 30 % (grünes Feld), und so weiter.

Ein griffiges Mittel für einen raschen, überschlagsmässigen Vergleich zwischen Kategorien stellen die angezeigten *Quartile* dar, das heisst die 25%- und 75%-Quantile: Die Q75-Marke bezeichnet den Wert, unterhalb welchem 75 % einer Kategorie liegen. Analog bezeichnet die Q25-Marke den Wert, unterhalb welchem 25 % einer Kategorie liegen. Im  $K_2O$ -Beispiel liegt Q75 (G), die Obergrenze von 75 % der grünen Gläser, deutlich unterhalb einem  $K_2O$ -Wert von 1. Q25 (F), die Un-

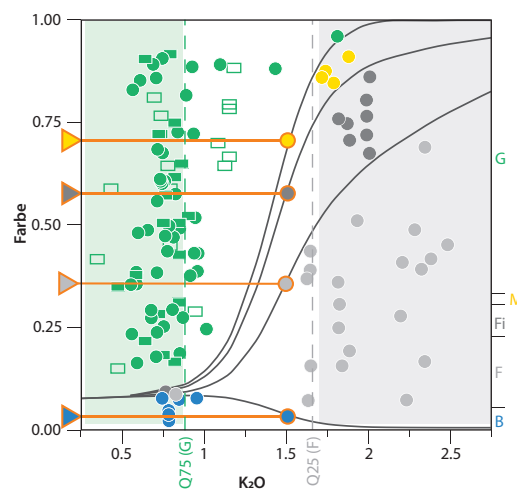


Abb. 87b: Diese Abbildung dient zur Veranschaulichung des *logistic regression plot* (von  $K_2O$  versus Farbkategorien).

tergrenze von 75 % der farblosen Gläser, liegt bei einem  $K_2O$ -Wert deutlich über 1.5. Noch deutlicher ausgedrückt: Die unteren 75 % der Kaliumwerte der grünen Gläser überschneiden sich nicht mit den oberen 75 % der Kaliumwerte der farblosen/opakweissen Gläser. Bei Kalium besteht somit kaum eine Überschneidung der bunten Hohl- und Flachgläser mit den farblosen und opakweissen Hohlgläsern. Die Differenz ist auch statistisch signifikant, doch geht es in diesem Beispiel nicht um einen Test, sondern um eine visuelle Veranschaulichung.

Umgekehrt beim Phosphor (Abb. 87a): Der  $P_2O_5$ -Gehalt der farblosen Gläser überlappt nur bei den obersten 25 *Percentilen* mit den niedrigsten 25 *Percentilen* der grünen und blauen Gläser. Die vier Milchgläser setzen sich aufgrund ihres höheren  $P_2O_5$ -Gehaltes deutlich von den restlichen Gläsern ab.

Abb. 88: scatterplot  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  / MnO. Oben und seitlich eingeblendet die Gew.-%-Intervalle des MnO- bzw.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalts aller analysierten Hohl- und Flachgläser.

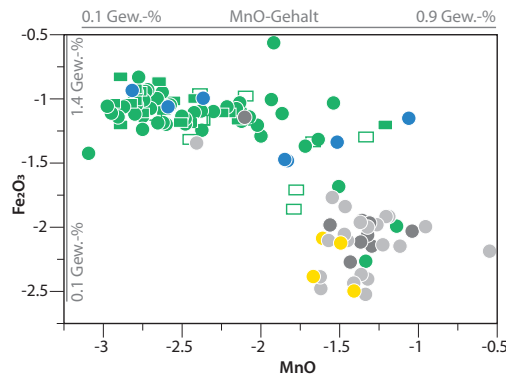
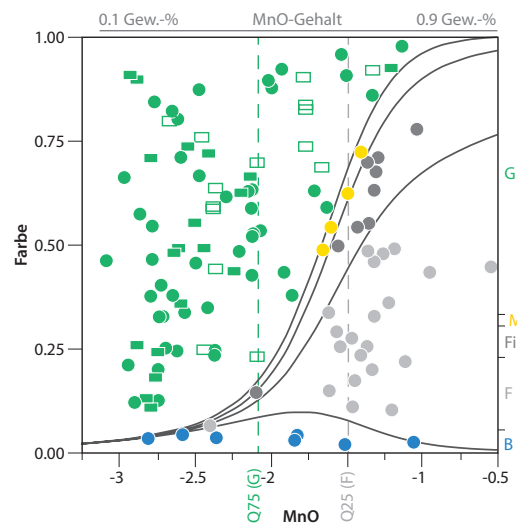


Abb. 89: Logistische Regression von MnO versus Farbkategorien; MnO mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) der bunten und farblosen Gläser. Oben eingeblendet das Gew.-%-Intervall des MnO-Gehalts aller analysierten Hohl- und Flachgläser.



Konkret: Die farblosen Hohlgläser (K-Ca-3-Glas) enthalten im Vergleich zu den bunten Hohl- und Flachgläsern (K-Ca-2-Glas) deutlich mehr Kalium (Abb. 86–87). Ein Vorteil eines höheren Kalium- bzw. eines geringeren Calciumgehaltes ist das schnellere Erreichen des Glasschmelzpunktes. Abb. 71 und 93 verdeutlichen diesen Umstand: Das in der  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{CaO}$ -Darstellung hinterlegte Schmelzdiagramm zeigt, dass die Pottaschengläser (K-Ca-3) von Court, Pâturage de l'Envers im Schmelzbereich von 950 und 1300 °C plotten und somit einen niedrigeren Schmelzpunkt aufweisen. Die kaliumärmeren Gläser (K-Ca-2) hingegen streuen im Bereich 1350 bis 1400 °C. In derselben Dreiecksdarstellung (Abb. 93–94) lässt sich ebenfalls ablesen, dass die Pottaschengläser, einhergehend mit dem höheren Kaliumgehalt, einen niedrigeren Calciumgehalt als die Holzaschengläser aufweisen.

### Exkurs: Manganoxid in der Glasproduktion

Der Mangangehalt in unterschiedlichen Pflanzenarten resp. Baumarten kann von Natur aus sehr stark variieren.<sup>307</sup> Wie bereits über die Herstellung von Pottaschenglas erwähnt (s. auch Kap. 4.1.3), enthält die Pottasche wegen des Extraktionsprozesses wenig färbende Komponenten (wie z. B.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), was wiederum das Herstellen von farblosem Glas begünstigt bzw. voraussetzt (Abb. 88):

Tatsächlich ist der  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalt der grünen und blauen Gläser (> 0.3 Gew.-%) höher als derjenige der farblosen Gläser. Interessanterweise ist der MnO-Gehalt der farblosen Gläser leicht höher als der MnO-Durchschnittswert der bunten Glaskategorie.

Geht man davon aus, dass beim Holzascheextraktionsprozess neben  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und  $\text{P}_2\text{O}_5$  auch MnO, MgO und CaO im Rückstand zurückbleibt (s. Abb. 84), so mag der leicht höhere MnO-Gehalt der farblosen Gläser erstaunen. Denn für die Pottaschengläser wurde – neben Netzwerkbildner ( $\text{SiO}_2$ ) und -stabilisator (CaO) – nur noch Pottasche (Netzwerkmodifizierer) verwendet, das heisst die Pottaschengläser müssten auch manganärmer, wenn nicht manganfrei, sein.

Im Gegenteil (Abb. 89), die farblosen Gläser zeigen durchschnittlich einen leicht höheren Mangangehalt. Der höhere Mangangehalt lässt sich aber nur durch intentionelle Zugabe von wenig Mangan in Form von zum Beispiel Braunstein zu der mit Pottasche aufbereiteten Glascharge erklären.<sup>308</sup> In der Tat handelt es sich bei den farblosen Court, Pâturage-de-l'Envers-Hohlgläsern um eine Zugabe von 0.2 bis zu 0.8 Gew.-% MnO, denn das Pottaschenglasgemenge dürfte ursprünglich manganfrei gewesen sein (Abb. 129: C, E, G).<sup>309</sup> Dies im Gegensatz zu Gläsern, wo die Holzasche in unveränderter Form als Flussmittel verwendet worden ist, dort ist ein variierender MnO-Anteil durch die Holzasche in das Glasgemenge gelangt. Die erwünschte Farblosigkeit war hauptsächlich durch die Extraktion der Holzasche bedingt und somit auch durch die Reduzierung des Eisengehaltes.<sup>310</sup> Die Zugabe von Mangan dürfte zudem eine noch eventuelle Grünstichigkeit abgeschwächt bzw. neutralisiert haben. Maus/Jenisch konnten dasselbe für ihre Pottaschengläser feststellen.<sup>311</sup>

307 Stern/Gerber 2004b, 140 Tab. 1(a); Geilmann/Brückbauer 1954.

308 Mindestens drei Bruchstücke von Manganerz sind auf der Grabung Court, Pâturage de l'Envers zum Vorschein gekommen. Sie haben einen metallischen Aspekt und enthalten laut chemischen Analysen 80 % Mangan (s. chap. 2.1.5.1).

309 Stern/Gerber 2004b, 140 Tab. 1(a): Holzaschenextrakt jeweils ohne Mangananteil.

310 S. auch Ullmann 1919, 230; zu geringem Eisengehalt in farblosem Glas s. auch Maus/Jenisch 1997/98, 372; 394–395, Abb. 16a–b.

311 Maus/Jenisch 1997/98, 397, Tab. 14.



Bezborodov rekapituliert und argumentiert, dass farblose und fast farblose Gläser – sowohl Natron- wie Kaliglas – eine Variationsbreite an Mangangehalt ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ) von 0.009 bis zu 1.65 % enthalten können.<sup>312</sup> Geilmann/Brückbauer, zusammengefasst in Bezborodov<sup>313</sup>, kamen in ihren Untersuchungen zum Schluss, dass es keinerlei Beweise dafür gibt, dass den von ihnen untersuchten Proben absichtlich Mangan zwecks Entfärbung der Gläser beigelegt worden war. Die hohen Mangananteile liefern an und für sich keinen Beweis für die spezielle Einbringung derselben in das Gemenge. Nur Mangan als Entfärbung hätte die grünliche Färbung nicht ganz beseitigen, sondern nur abschwächen können. Eine Entfärbung durch Mangan wäre nur dann möglich, wenn der Anteil an Eisenoxid in der Glascharge nicht grösser als 0.1 % sei.<sup>314</sup> Bezborodov unterstreicht somit, dass der geringe Eisenanteil für farbloses Glas von grösserer Bedeutung ist als die Manganzugabe.

Neben der Feststellung, dass zweiwertiges Eisen eine wesentlich stärker färbende Wirkung aufweist als dreiwertiges und durch Oxidation des Eisens in der Glasschmelze – etwa durch Braunstein ( $\text{MnO}_2$ ) – eine Reduktion der Stichigkeit erzielt werden kann, wird auch eine physikalische Erklärung genannt:

Mangangefärbtes Glas verursacht eine geringe Absorption der einzelnen Farben des Lichtspektrums, und zwar recht gleichmässig über den gesamten Spektralbereich, am geringsten im Rot und Violett, am stärksten im Grün. Dagegen zeigt eisengefärbtes Glas die umgekehrten Verhältnisse, hohe Durchlässigkeit in Gelb und Blaugrün, geringe in Rot und Violett. Nach Ullmann<sup>315</sup> wird beim Durchgang des Lichts durch zwei hintereinander liegende Schichten von Gläsern, von denen eines durch Eisen, das andere durch Mangan getönt ist, die vom ersten Glas durchgelassene Spektralfarbe vom zweiten Glas absorbiert, und es resultiert farbloses, etwas abgeschwächtes, ins Graue spielende Licht. Eine solche subtraktive Entfärbung gilt wegen der Minderung der Lichtintensität als unvollkommen.

Voraussetzung für die Wirksamkeit der beiden Entfärbungsmodelle dürfte ein insgesamt geringer Eisengehalt von vermutlich unter 0.2 bis 0.5 Gew.-%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sein. Der praktikabelste Weg zu einem farblosen Glas führt

demzufolge über die Verwendung von möglichst eisenarmen Glasrohstoffen – Quarzsand, Flussmittel, Stabilisator.

*Caveat:* Der durch den Extraktionsprozess entzogene Calciumgehalt ( $\text{CaO}$ ) muss dem Pottaschenglas wieder zugefügt werden. Durch die chemischen Analysen ist nicht bestimmbar, in welcher Form der  $\text{CaO}$ -armen Glascharge wieder Kalk zur Stabilisierung zugefügt worden ist. Wir dürfen aber davon ausgehen, dass es in «reiner» Form gewesen sein muss, um die mühsam durch den Extraktionsprozess geläuterte Glascharge nicht wieder zu verunreinigen. Relativ reines Kalkgestein (Jurakalk; bis über 99 %  $\text{CaCO}_3$ , Calciumcarbonat) ist um Court (Pâturage de l'Envers) ubiquitär, Kalk als Zusatz zur Pottaschenglascharge dürfte also kein Problem dargestellt haben – im Gegensatz wohl zur Glasherstellung im Schwarzwald, wo reine Kalke bekanntlich nicht ubiquitär sind. Knochenasche als Zusatz dürfte für farbloses Glas nicht in Frage gekommen sein, sonst wäre ihr Phosphatgehalt ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) sehr viel höher (wie z. B. für Milchglas, s. Abb. 85).

Unklar ist, was mit dem Rückstand – reich an  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , und so weiter –, der bei dem Extraktionsprozess der Holzasche zurückblieb, geschah (s. auch Abb. 84). In welcher Form, wenn überhaupt, wurde er weiterverwendet? Bei den Experimenten von 2004 wurde für das K-Ca-3-Glas ein Teil des Rückstands aus dem Extraktionsprozess als Calciumlieferant zugeführt.<sup>316</sup> In Court, Pâturage de l'Envers wird das mit grosser Wahrscheinlichkeit für das K-Ca-3-Glas nicht angewendet worden sein. Vielleicht wurden jedoch kleinere Mengen als erwünschte  $\text{CaO}$ -Zufuhr spezifischen Glaschargen des K-Ca-2-Glases – insbesondere erwünschtem dunklem, bunten Glas – beigegeben. Vermutungen darüber lassen sich anstellen, aber beweisen lässt sich keine. Andererseits dürfte den damaligen Glasmachern bewusst gewesen sein, dass der Rückstand der Pottaschenextraktion zwar einen erwünschten stabilisierenden Effekt auf die Glasqualität haben würde, aber auch einen unerwünschten färbenden Einfluss (vgl. dazu auch Kap. 4.3.3).

Silvestri/Longinelli/Molin, die im Rahmen Ihrer O-Isotopen Untersuchung 16 Glasfragmente von Court, Pâturage de l'Envers analysiert haben<sup>317</sup>, finden in ihren wenigen Proben ebenfalls die zwei unterschiedlichen

312 Bezborodov 1975, 65–70.

313 Bezborodov 1975.

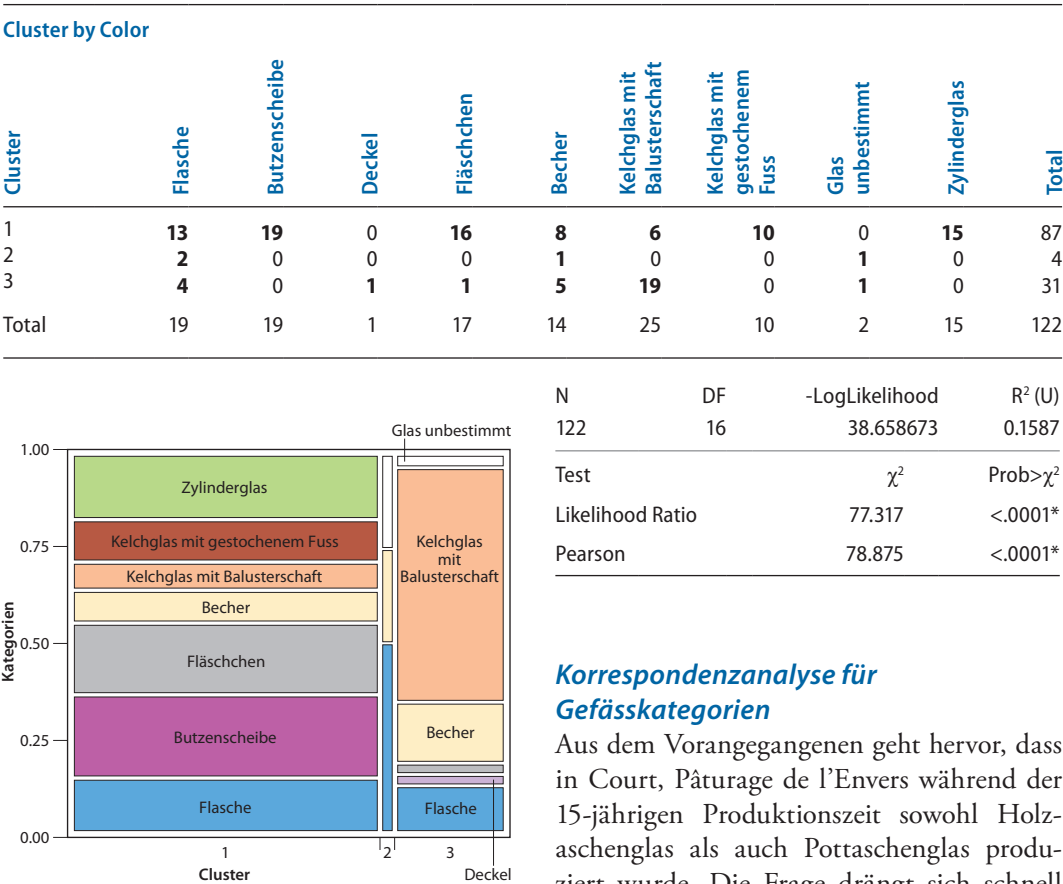
314 Bezborodov 1975, 70; aufgrund experimenteller Untersuchungen; Maus/Jenisch 1997/98, 394; auch Wedepohl 2003, 27.

315 Ullmann 1919, 232.

316 Stern/Gerber 2004b, 150.

317 Silvestri/Longinelli/Molin 2010, 557–558, Appendix B.

Abb. 90: *mosaic plot* und zugehörige Kontingenztafel; *k*-means *clusters* (*a-posteriori*-Kategorien) werden den exogenen Kategorieinformationen (Glaskategorien der Hohl- und Flachgläser, *a-priori*-Kategorien) gegenübergestellt.



Glastypen K-Ca-2 und Ka-Ca-3 (Proben SVI 8, 11, 14) vertreten. Sie postulieren aber ohne weitere Begründung die Herstellung des K-Ca-3-Glases aus Quarzsand, Pottasche (Holzaschenextrakt) und Rückstände der Pottaschenextraktion (*leached ash*), wobei sie nicht ganz ausschliessen wollen, dass nicht auch kaliumreiche Asche, wie sie beispielsweise aus Farn gewonnen werden kann, den entsprechend hohen Kaliumgehalt geliefert haben könnte. Es ist denkbar, dass partiell auch Farn einer Glascharge beigemischt werden kann, aber als Hauptlieferant für das K-Ca-3-Glas von Court, Pâturage de l’Envers dürfte er nicht gedient haben.<sup>318</sup>

Anders Cílová/Woitsch, sie postulieren für das mittelalterliche böhmische K-Ca-3-Glas auch die Möglichkeit einer Mischung von Quarzsand, Holzasche [Buche] und Pottasche<sup>319</sup>; bei dieser Mischung musste nicht noch zusätzlich Kalk zugefügt werden.

Korrespondenzanalyse für Gefässkategorien

Aus dem Vorangegangenen geht hervor, dass in Court, Pâturage de l’Envers während der 15-jährigen Produktionszeit sowohl Holz- aschenglas als auch Pottaschenglas produziert wurde. Die Frage drängt sich schnell auf: Können nun gewisse Präferenzen festgestellt werden? In einer Kontingenztafel werden die Glaskategorien den durch die *k*-means ermittelten *clusters*, die – wie wir nun wissen – wiederum unterschiedliche Glastechnologien (s. auch Abb. 83) repräsentieren, gegenübergestellt (Abb. 90):

Die prozentualen Anteile der verschiedenen Gefässkategorien in der Probenserie entsprechen nicht denjenigen im Gesamtmaterial. Die Selektion umfasst eine attributiv repräsentative Auswahl der Formen und Farben. Einige Kategorien mussten in relativer Übervertretung zu ihrem Gesamtvorkommen analysiert werden, damit die chemischen Untersuchungen eine statistisch signifikante Basis erlangten. Quantitativ handelt es sich gerade deshalb nicht um *random samples*: die relativen Anteile sind nicht 1:1 auf das Gesamtrepertoire übertragbar. Von dieser Einschränkung nicht beeinträchtigt sind aber allgemein herleitbare Tendenzen, von denen die wichtigsten hier aufgezeigt werden:

Das Flachglas (Butzenscheibe und Zylinderglas) gehört ausnahmslos *cluster* 1 (linke Kolonne) an. Das Fläschchen gehört haupt-

318 Zu Farn als Aschenlieferant s. ausführlich Stern/Gerber 2009.  
319 Cílová/Woitsch 2012, 378–379.

Categories by Color						
Gefässformen	B	F	Fi	M	G	Total
Flasche	4	2	1	2	10	19
Deckel	0	0	1	0	0	1
Fläschchen	2	1	0	0	14	17
Becher	1	3	0	1	9	14
Kelchglas mit Balusterschaft	0	15	6	0	4	25
Kelchglas mit gestochenen Fuss	0	0	0	0	10	10
Glas unbestimmt	0	0	1	1	0	2
Total	7	21	9	4	47	88

N	DF	-LogLikelihood	R <sup>2</sup> (U)
88	24	36.922261	0.3351

Test	$\chi^2$	Prob> $\chi^2$
Likelihood Ratio	73.845	<.0001*
Pearson	76.640	<.0001*

sächlich zu *cluster* 1. Das Kelchglas mit Balusterschaft findet sich in *cluster* 1 und 3 wieder. Die Flasche und der Becher zeigen Anteile an allen drei *clustern*, währenddessen das Kelchglas mit gestochenen Fuss nur in *cluster* 1 erscheint.

Das Flachglas gehört somit ausschliesslich der Gruppe der grünstichigen/bunten Gläser (K-Ca-2-Glas) an, das heisst seine Produktion beschränkte sich auf eine (Produktions-) Technologie. Bei den eigentlichen Glasgefässen, den sogenannten Hohlgläsern, scheinen sich mit Ausnahme des Kelchglases mit gestochenen Fuss keine eindeutigen Vorlieben abzuzeichnen. Das Repertoire der Flaschen, Fläschchen, Becher und des Kelchglases mit Balusterschaft wurde sowohl als K-Ca-2 (Holzaschenglas/Waldglas, bunt) als auch als K-Ca-3 (Pottaschenglas, farblos oder opakweiss) hergestellt (s. auch Abb. 91), je nach dem, welcher Farbcharakter erwünscht gewesen sein mag; wobei der Anteil der opakweissen Gläser am Gesamtmaterial verschwindend klein ist (s. Kap. 4.2.3.1, s. v. Erste Schlussfolgerungen).

Mithilfe der Korrespondenzanalyse wird die Frage nach den Präferenzen (s. oben) intensiviert (Abb. 92). Zur CA siehe auch ④.C.

Die Gefässformen: Flasche, Fläschchen, Becher und Kelchglas mit gestochenen Fuss korrespondieren im Schwerpunkt mit der Produktion der K-Ca-2-Gläser (hier als bunte Gläser gekennzeichnet). Das Kelchglas mit Balusterschaft und der eine Deckel entspre-

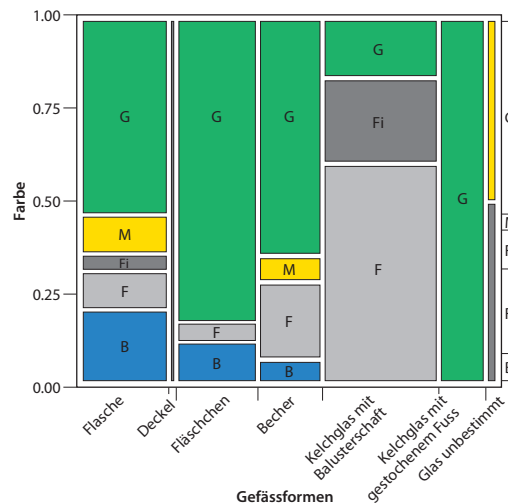


Abb. 91: *mosaic plot* und zugehörige Kontingenztafel; die Gefässkategorien (nur Hohlgläser: n = 88) werden den Farbinformationen gegenübergestellt. Die Farbkategorien korrespondieren hier gleichzeitig auch mit unterschiedlichen Glastechnologien (bunt: G, B = K-Ca-2-Glas; farblos und opakweiss: F, Fi, M = K-Ca-3-Glas).

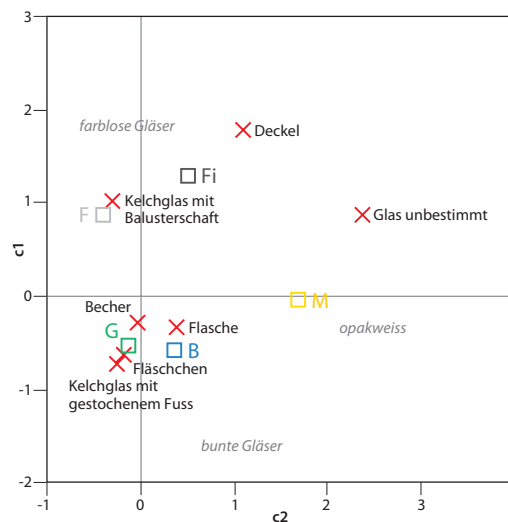


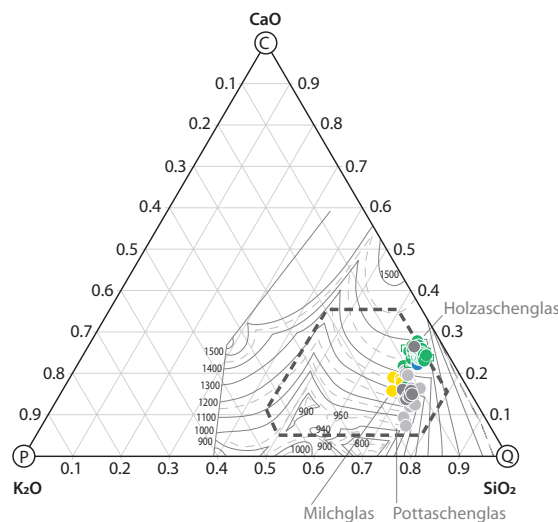
Abb. 92: Korrespondenzanalyse der Gefässformen (nur Hohlgläser) aus Abb. 91 versus Farbkategorien / korrespondierend mit unterschiedlichen Glastechnologien.

	Singular Value	Inertia	Portion	Cumulative
c1	0.72475	0.52527	0.6031	0.6031
c2	0.46168	0.21315	0.2447	0.8479

chen eher der K-Ca-3-Produktion (farbloses Glas). Die Kategorie: Glas unbestimmt, dessen Fragmente (n = 2) keinen gesicherten Gefässformen zugeschrieben werden konnten, ist hier nicht relevant.

Es versteht sich von selbst, dass die Aussagen, die in Bezug auf Gefässformen versus Farbkategorien bzw. versus Glastechnologie an dieser Stelle gemacht werden, nur auf die 88 bzw. 122 Probestücke bezogen werden können.

Abb. 93: *ternary plot* mit  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{CaO}$  mit den Glasanalysen (nicht *clr*-transformiert) von Court, Pâturage de l'Envers; dem plot der Analysewerte sind das Schmelzdiagramm nach Morey/Kracek/Bowen (1930) und ein Trapezoid als Streubereich, in dem Glasdaten jeglicher Art üblicherweise plotten, unterlegt. Die zweite Grafik stellt eine Detailansicht des Streubereichs dar.



### Dreiecksdarstellung

Die chemischen Hauptkomponenten  $\text{SiO}_2$  (Netzwerkbildner),  $\text{K}_2\text{O}$  (Netzwerkmodifizierer) und  $\text{CaO}$  (Netzwerkstabilisator) machen um die 85 und 95 Gew.-% des Glases aus und können somit auch in einer Dreiecksdarstellung (*ternary plot*) aufgezeigt werden (s. Kap. 4.1.3) (Abb. 93):

Die beiden, durch ihre Herstellungstechnologie differenzierten Gruppen sind auch hier deutlich erkennbar (Abb. 94):

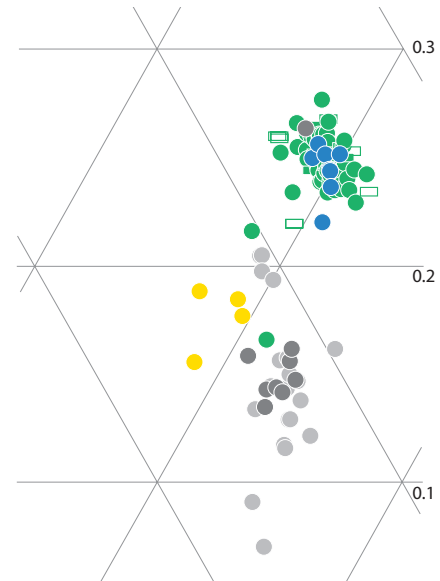
Glas-Typ	$\text{SiO}_2$ (Gew.-%)	$\text{K}_2\text{O}$ (Gew.-%)	$\text{CaO}$ (Gew.-%)
K-Ca-2	65–70	4–8	25–30
K-Ca-3	70–75	10–18	10–17

Abb. 94: Netzwerkbildner, -modifizierer und -stabilisator der K-Ca-2- und K-Ca-3-Gläser (in Gew.-%), vgl. mit Abb. 93.

### 4.2.3.2 Spurenelemente

#### ②.B.6

Die *Multivariate Analyse* (Abb. 95) gibt einen Überblick über die Spurenelemente, wobei es zu betonen gilt, dass die angewendete Analyse-routine nicht auf die quantitative Erfassung von Spurenelementen ausgerichtet war, sondern jene nur zur Kontrolle bzw. zur Zusatzinformation mitgemessen worden sind (vgl. Kap. 4.2.2).



Erste Beobachtungen aufgrund der *scatterplot matrix* umfassen:

1. Die blauen Hohlgläser haben einen nachweisbar höheren Kobalt- (Co) und Bleigehalt (Pb).
2. Die grünstichigen Hohl- und Flachgläser zeigen schwache positive Korrelation bei Zn/Ni, Sr/Ni, Zr/Ni, hingegen eine negative bei Ni/Sb.
3. Zusammen mit den blauen zeigt ein Teil der farblosen Hohlgläser, vor allem die filigranverzierten, einen höheren Bleigehalt, siehe zum Beispiel Sb/Pb und Sn/Pb, und so weiter. Entsprechend weisen die grünen Gläser einen geringeren Bleigehalt auf (bei allen Relationen).
4. Die farblosen Gläser zeigen generell einen leicht höheren Antimonanteil; Zn/Sb, Sr/Sb und Zr/Sb sind tendentiell negativ korreliert.
5. Die grünen Gläser haben einen durchgehend höheren Strontium- (Sr), Zink- (Zn) und Zirkongehalt (Zr) als die blauen, farblosen und weissopaken Gläser. Dabei zeigt Zn eine auffällige Korrelation mit Sr, Zn/Zr und Sr/Zr eine etwas schwächere.

Die Beobachtungen 1–5 (s. Abb. 95) sollen nachfolgend validiert werden.

### Kommentar zu Beobachtung 1 (YG+WBS)

Waldglas (K-Ca-2), Hohl- und Flachgläser umfassend, weist typischerweise eine grüne Farbe auf. Ursache hierfür sind im Wesent-



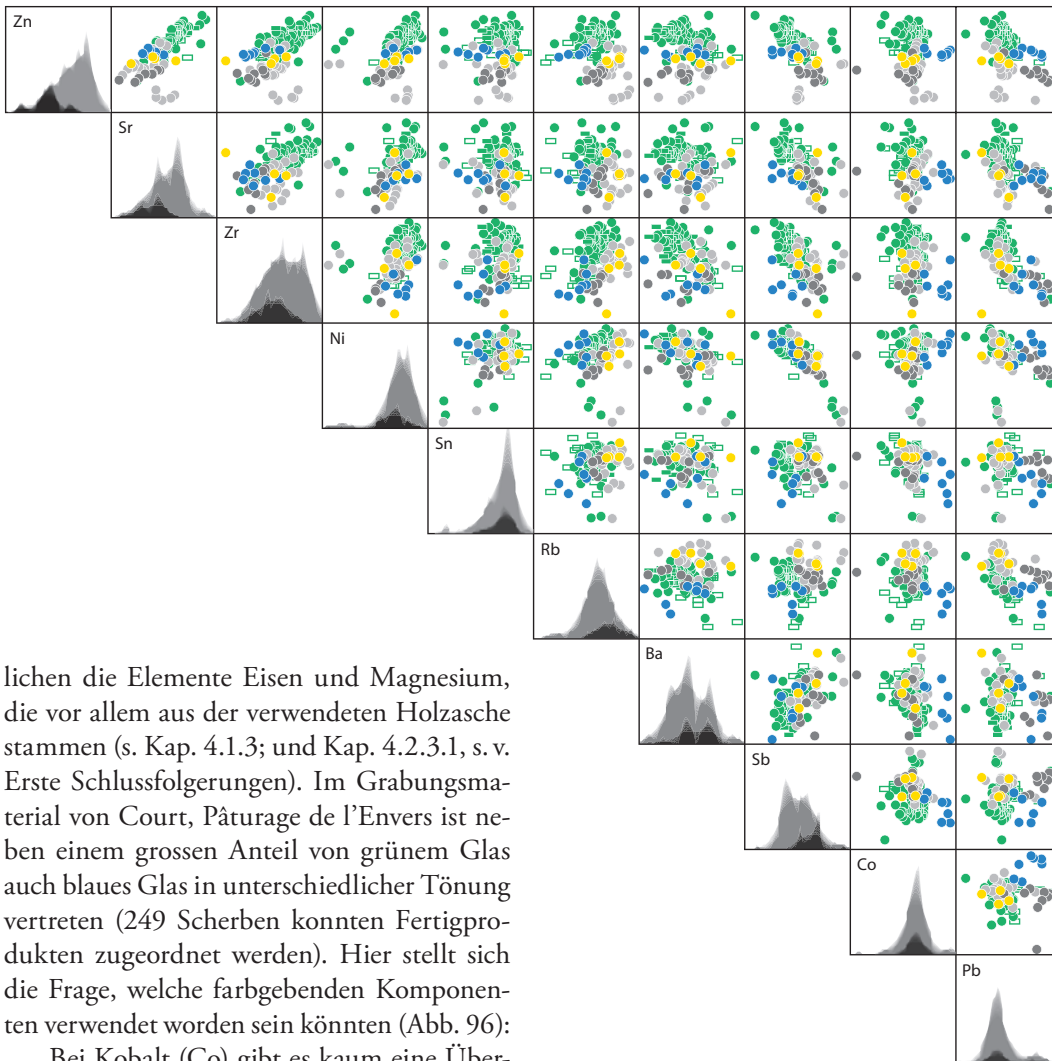


Abb. 95: *scatterplot matrix* mit den ausgewählten Spurenelementen: Zn, Sr, Zr, Ni, Sn, Rb, Ba, Sb, Co, Pb; die Farbkategorien werden angezeigt. In der Diagonalen *shadowgrams* der Verteilungsdichte. Die dunklere Schattierung im *shadowgram* markiert die Verteilung des farblosen und filigranverzierten Glases. Die Matrizen sind in der Reihenfolge abnehmender Kovarianz zwischen den Variablen angeordnet.

lichen die Elemente Eisen und Magnesium, die vor allem aus der verwendeten Holzasche stammen (s. Kap. 4.1.3; und Kap. 4.2.3.1, s. v. Erste Schlussfolgerungen). Im Grabungsmaterial von Court, Pâturage de l'Envers ist neben einem grossen Anteil von grünem Glas auch blaues Glas in unterschiedlicher Tönung vertreten (249 Scherben konnten Fertigprodukten zugeordnet werden). Hier stellt sich die Frage, welche farbgebenden Komponenten verwendet worden sein könnten (Abb. 96):

Bei Kobalt (Co) gibt es kaum eine Überschneidung der grünen und farblosen Hohl- und Flachgläser mit den blauen Gläsern: 75 % der unteren Co-Werte der grünen, farblosen und opakweissen Gläser liegen generell tiefer als die oberen 75 % der blauen Gläser.

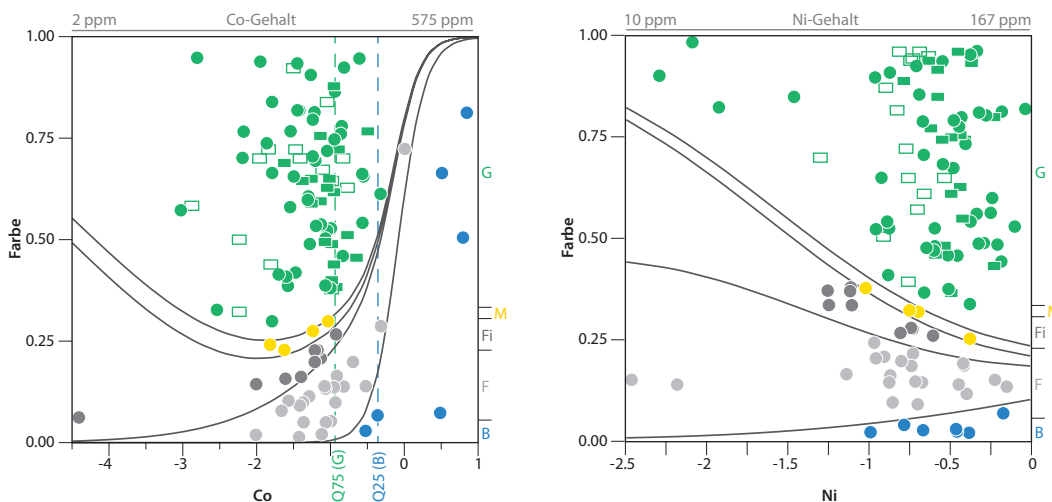


Abb. 96: Logistische Regression von Co und Ni versus Farbkategorien; Co mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) der blauen und grünen Gläser. Oben eingeblendet die ppm-Intervalle des Co- bzw. Ni-Gehalts aller analysierten Hohl- und Flachgläser.

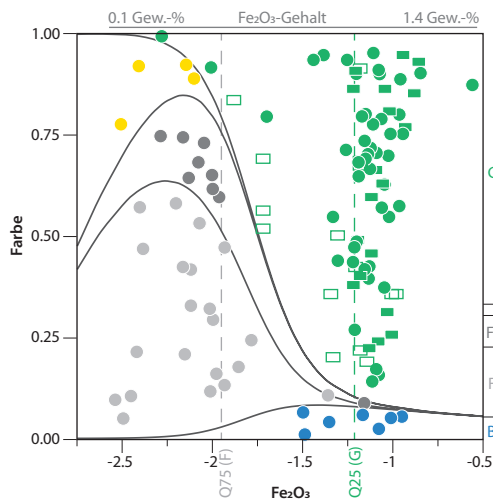
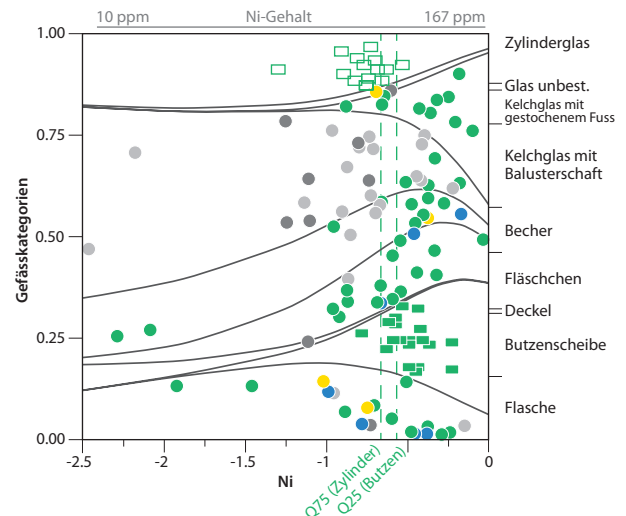


Abb. 97, links: Logistische Regression von  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  versus Farbkategorien;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) der grünen/bunten und farblosen Gläser. Oben eingeblendet das Gew.-%-Intervall des  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalts aller analysierten Hohl- und Flachgläser.

Abb. 98, rechts: Logistische Regression von Ni versus Hohl- und Flachglas-Kategorien. Ni mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) der Butzenscheiben und des Zylinderglases. Oben eingeblendet das ppm-Intervall des Ni-Gehalts aller analysierten Hohl- und Flachgläser.



Die blauen Gläser haben im Vergleich zu den farblosen Hohl- und Milchgläsern ebenfalls einen höheren Eisengehalt ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), liegen aber mit diesem Parameter im Durchschnitt der restlichen bunten Gläser (Abb. 97). Dies ist nicht weiter erstaunlich, gehören die blauen Gläser doch zur Kategorie der Holzaschen-gläser (K-Ca-2), die allgemein einen höheren  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Wert als die farblosen aufweisen (s. Kap. 4.2.3.1, s. v. Erste Schlussfolgerungen). In der Tat dürfte durch Zugabe von Kobalt die erwünschte blaue Färbung erwirkt worden sein. Kobalt kann schon bei einem niedrigem Gehalt von 0.05 bis 0.2 Gew.-% CoO zu einem blauen Glas führen und ist bereits früh verwendet worden.<sup>320</sup> Eigene Erfahrungen bei der experimentellen Herstellung von Glas aus unterschiedlichen Holzaschen und Sand zeigen, dass blaufarbiges Glas ohne Zusatz färbender Komponenten resultieren kann (s. Abb. 125), wenn zum Beispiel die dafür verwendete Asche manganreich war, wie das bei Birkenasche aus dem Schwarzwald zu beobachten war<sup>321</sup> (vgl. auch mit Abb. 88–89).

Da die verwendete Röntgenfluoreszenzanalyse auf die quantitative Erfassung von Haupt- und Nebenkomponten ausgerichtet war und nicht auf die Analyse von Spurenelementen, war nicht auszuschließen, dass als Spurenelement vorhandenes Kobalt möglicherweise übersehen wurde, zumal die analytische Software schwache Messsignale mittels eines Statistikfilters unterdrückt. Da aber bei den Analysen der Jahre 2002 und 2004 nicht nur Prozentzahlen ermittelt und abgespeichert wurden, sondern für jedes Analyseelement

auch die originalen Nettoimpulszahlen, war eine nachträgliche Auswertung einzelner Spurenelemente möglich (vgl. Abb. 74a–b, mit Ergebnissen für Kobalt und Nickel). Es ist in der Tat ein Zusammenhang von blauer Färbung und Kobaltgehalt nachweisbar, und zwar nicht nur für Glasfragmente, sondern auch für Produktionsabfälle wie Pfeifenabschlag und Glas-tropfen (s. auch Kap. 4.2.3.4). Die Assoziation von Kobalt und Nickel (vgl. Abb. 95, Ni/Co nur für die blauen Gläser tendenziell korrelierend) dürfte lagerstätten-/herkunftsspezifisch sein; als Herkunft der blaufärbenden Komponente käme einerseits das Erzgebirge in Frage, wo seit 1635 eine Produktion von Kobaltblau nachgewiesen ist (Aue, Erzgebirge<sup>322</sup>), oder aber auch sehr viel näher liegend Blaufarbenwerke im Schwarzwald, die ihre Produktion erst in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts eingestellt hatten. Die Kobalterze, die in einer Reihe von Gängen im Mittleren Schwarzwald gefördert worden waren, wurden seit Anfang des 18. Jahrhunderts in drei Farbwerken (Wittichen, Alpirsbach und Nordrach) zur Smalte verarbeitet.<sup>323</sup> Detailliertere Aussagen sind nach dem heutigen Wissensstand nicht möglich.

### Kommentar zu Beobachtung 2 (YG)

Grüne Gläser haben einen unterschiedlich hohen Nickelgehalt (Ni), schwach korrelierend mit Zn, Sr und Zr. Bei der Gegenüberstellung von Ni versus Gefäßkategorien (Abb. 98) fällt auf, dass die Butzenscheiben einen tendenziell höheren Ni-Gehalt aufweisen als das Zylinderglas:

<sup>320</sup> Wedepohl 2003, 28 Tab. 1; Rehren 2001.

<sup>321</sup> Stern/Gerber 2004b, 140 Tab. 1(a).

<sup>322</sup> Hammer 2004, 115–116.

<sup>323</sup> Maus/Jenisch 1997/98, 372–373; für geochemische Paarung Ni mit Co, s. auch Maus/Jenisch 1997/98, 405.

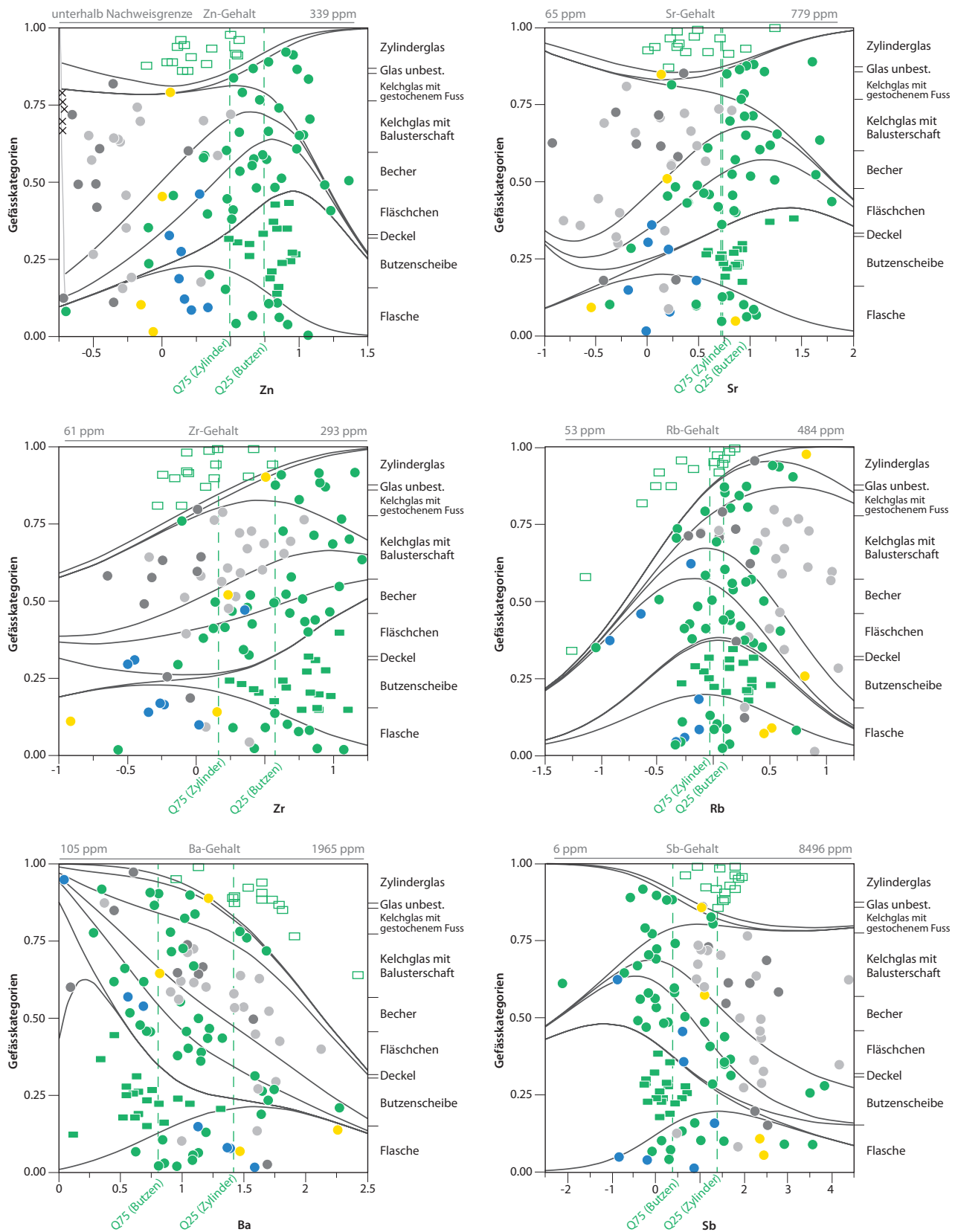


Abb. 99: Logistische Regression von Zn, Sr, Zr, Rb, Ba, Sb versus Hohl- und Flachglas-Kategorien; Zn, Sr, Zr, Rb, Ba, Sb mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) der Butzenscheiben und des Zylinder. Jeweils oben eingeblendet die ppm-Intervalle des Zn-, Sr-, Zr-, Rb-, Ba- und Sb-Gehalts aller analysierten Hohl- und Flachgläser. In der logistischen Regression von Zn sind Analysenwerte unterhalb der Nachweisgrenze von der Berechnung der logistischen Regression ausgeschlossen, werden aber in der Grafik (mit x gekennzeichnet) dokumentiert (3 A.1.1).

Das mag auf den ersten Blick rein zufällig sein. Aber vergleichbare Beobachtungen lassen sich auch bei anderen Spurenelementen machen (Abb. 99). Nichtparametrische Rangtests stützen ( $p > 0.01$ ) die mögliche Annahme signifikanter Unterschiede zwischen Zylinderglas und Butzenscheibe, doch liegt diese Fragestellung ausserhalb des Rahmens dieses Kapitels und bedürfte einer statistisch präziseren Formulierung, als sie unter den gegebenen Umständen möglich ist.

Die grünen Butzenscheiben und das grüne Zylinderglas unterscheiden sich generell in Bezug auf ausgewählte Spurenelemente. Die restlichen grünen Gläser zeigen keinerlei solche kategoriebezogenen Tendenzen. Zumindest bei 6 Spurenelementen (Zn, Zr, Rb, Ba, Sb und Ni) sind die Unterschiede auffällig. Dies dürfte nicht zufällig sein.

#### Kommentar zu Beobachtung 3

Wie schon aufgrund der *scatterplot matrix* (Abb. 95) zu ersehen, haben die blauen Hohlgläser (B) zusammen mit einem Teil der farblosen Gläser (Fi) einen sichtbar höheren Bleianteil (Pb) als die grünen Hohl- und Flachgläser (Abb. 100). Dabei ist der Antimongehalt (Sb) der blauen Gläser aber etwas tiefer als derjenige aller farblosen Gläser (F und Fi).

Der Sb-Gehalt der farblosen, filigranverzierten und opakweissen Gläser scheint leicht höher zu sein als derjenige der blauen und eines Teils der grünen Gläser. Interessanterweise zeigt auch hier das Zylinderglas einen anderen, leicht höheren Sb-Anteil als die Butzenscheiben.

Ginge man davon aus, dass Spurenelemente wie Pb und Sb bei der Holzaschenextraktion ebenfalls im Rückstand zurückbleiben, so ist der vermeintlich höhere Pb- und Sb-Anteil im farblosen und opakweissen Glas (K-Ca-3-Glas) doch zu erwähnen. Er mag, insbesondere bei den filigranverzierten, durch den weissen Fadendekor bedingt sein (s. Kap. 4.2.4.2). Antimonoxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) kann aber auch wissentlich als Trübungsmittel der Glascharge zugegeben worden sein.<sup>324</sup> Warum das grünstichige Zylinderglas homogen einen höheren Sb-Anteil, äquivalent zu den farblosen Hohlgläsern (s. auch Abb. 99), aufweist, ist nach wie vor erklärungsbedürftig.

#### Kommentar zu Beobachtung 4

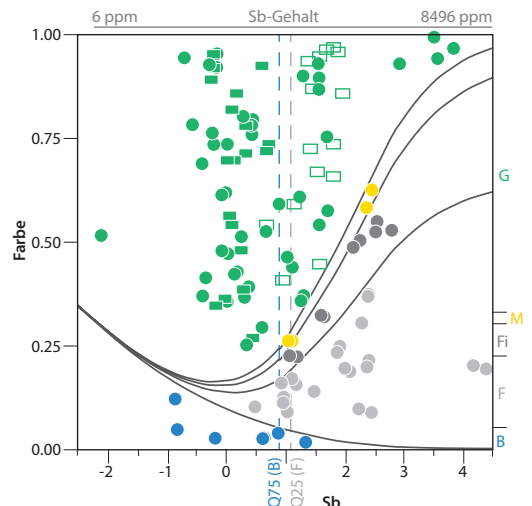
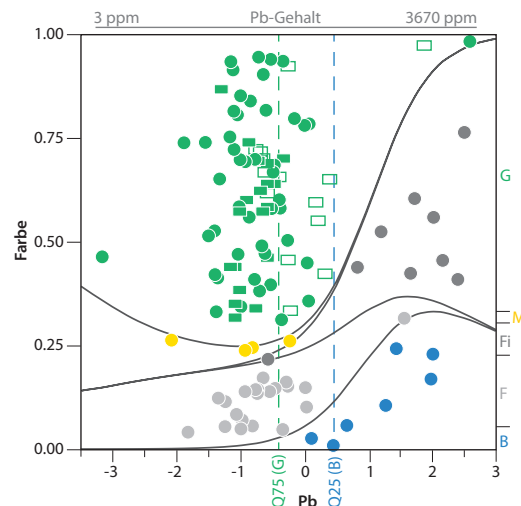
Siehe Abbildungen 98–100 und deren Kommentare.

#### Kommentar zu Beobachtung 5

Die grünen Gläser (mit Ausnahme des Zylinderglases; vgl. mit Abb. 99) haben generell höhere Zink- (Zn), Strontium- (Sr) und Zirkonwerte (Zr) im Vergleich mit den blauen, farblosen und opakweissen Gläsern (Abb. 101; vgl. auch Abb. 99, 102):

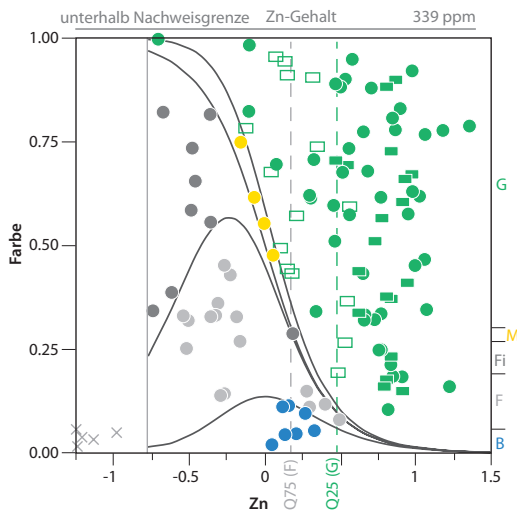
Zn/Sr und Zn/Zr korrelieren linear (vgl. Abb. 95); der Sr-Gehalt ist durch den CaO-Gehalt bedingt (s. auch Abb. 102), der Zn-Gehalt stammt wohl mehrheitlich aus der Asche und der Zr-Gehalt aus der Huppererde. Ein Teil der Spurenelemente ist wohl beim Extraktionsprozess der Holzasche – wie andere Komponenten auch (vgl. Abb. 84) – in deren Rückstand verblieben, so dass die Gruppe der

Abb. 100: Logistische Regression von Pb und Sb versus Farbkategorien; Pb und Sb mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) der blauen und grünen bzw. farblosen Gläser. Oben eingeblendet die ppm-Intervalle des Pb- und Sb-Gehalts aller analysierten Hohl- und Flachgläser.



324 Bezborodov 1975, 71–72; auch Bray 2003, 301, s. v. «antimony trioxide».





Pottaschengläser (K-Ca-3-Glas) konsequent merklich niedrigere Zn-, Sr-, Zr- und Ni-Werte aufweist. Dort, wo es sich anders verhält wie zum Beispiel bei Blei (Pb) und Antimon (Sb) (Abb. 100), mag der leicht höhere Pb- und Sb-Gehalt in den farblosen Gläsern in Zusammenhang mit der Herstellungstechnik der *à-la-façon-de-Venise*-Glasgefäße stehen. Diese Erklärung ist aber nicht anwendbar auf die blauen Hohlgläser, die grundsätzlich zur Gruppe der Holzaschengläser gehören (K-Ca-2-Glas) und die bei gewissen Spurenelementen (Zn, Sr, Zr) ähnlich niedrigere Werte wie die farblosen Gläser aufweisen.

#### 4.2.3.3 Chemische Haupt- und NebenkompONENTEN versus Spurenelemente

Die unten stehende *MVA* untersucht die Korrelation von Hauptkomponenten zu Spurenelementen, die aufgrund ihrer geochemischen Verwandtschaft einander gegenübergestellt werden. Der allgemeinen Konvention folgend sind auch hier die Hauptkomponenten in oxidischer Form wiedergegeben (Abb. 102).

CaO/Sr zeigt zwei Gruppen, K<sub>2</sub>O/Rb korreliert linear; CaO/Rb, CaO/Zr und K<sub>2</sub>O/Sr, K<sub>2</sub>O/Zr zeigen jeweils zwei Gruppenschwerpunkte, was aber nur aufgrund der exogenen Farbinformationen ersichtlich wird. Strontium (Sr) zu Kalium (K<sub>2</sub>O) und Rubidium (Rb) korreliert negativ. Die eine Gruppe wird jeweils durch die bunten Gläser gebildet, die andere durch die farblosen bzw. filigranverzierten. Ob Gruppenbildungen oder Korrelationen, die Tendenzen sind jeweils dieselben: Je

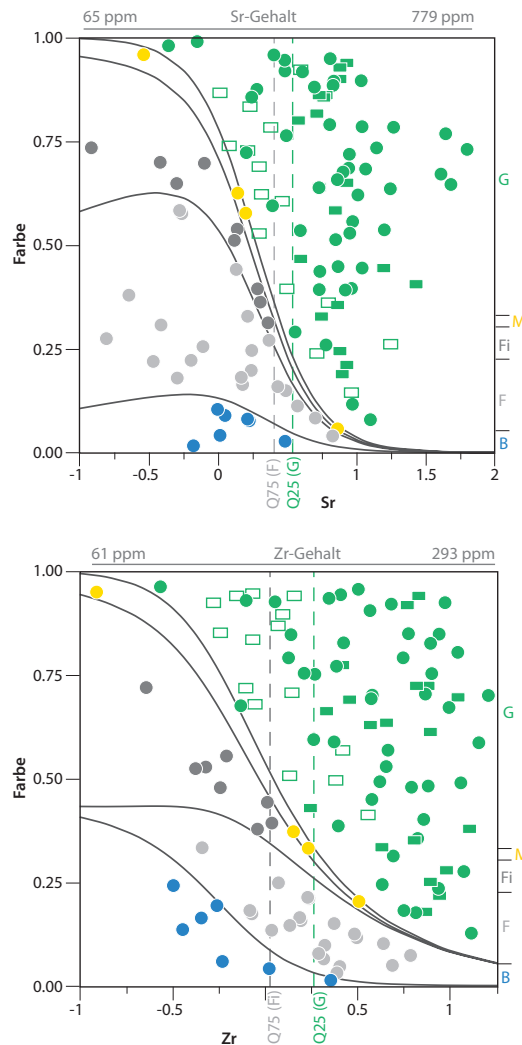


Abb. 101: Logistische Regression von Zn, Sr, Zr versus Farbkategorien; Zn, Sr, Zr mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) der grünen und farblosen Gläser. Oben eingeblendet die ppm-Intervalle des Zn-, Sr- und Zr-Gehalts aller analysierten Hohl- und Flachgläser. In der logistischen Regression von Zn sind Analysewerte unterhalb der Nachweisgrenze von der Berechnung der logistischen Regression ausgeschlossen, werden aber in der Grafik (mit x gekennzeichnet) dokumentiert (☞ ③ A.1.1).

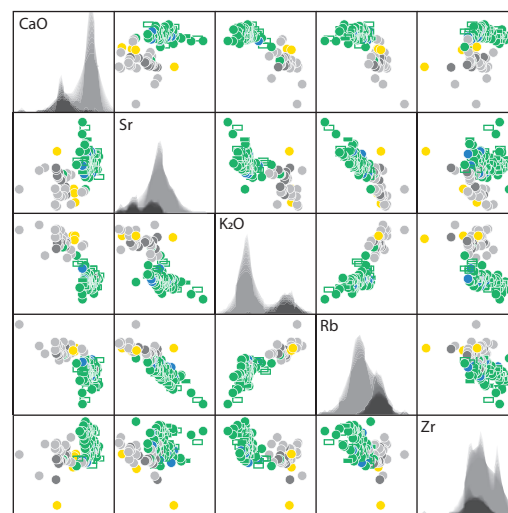


Abb. 102: *scatterplot matrix* mit den ausgewählten chemischen Hauptkomponenten und Spurenelementen: CaO/Sr, K<sub>2</sub>O/Rb und Zr. In der Diagonalen Histogramme der Dichtefunktion der jeweiligen Elemente; die dunklere Schattierung markiert die Verteilung des farblosen und filigranverzierten Glases.

mehr Calcium, desto mehr Strontium (für die bunten Gläser); je mehr Kalium, desto mehr Rubidium (für die farblosen Gläser). Dementsprechend je weniger Strontium für die farblosen Gläser, desto höher ihr Rubidiumgehalt,

und so weiter. Aufgrund des erhöhten Kaliumgehalts im Pottaschenglas (farblose und opakweisse Gläser) nimmt infolge des läuternden Extraktionsvorgangs die Konzentration gewisser Spurenelemente wie Sr, Zr (aus der nativen Baumasche) ab (s. auch Kap. 4.2.3.2).

4.2.3.4 Produktionsabfälle

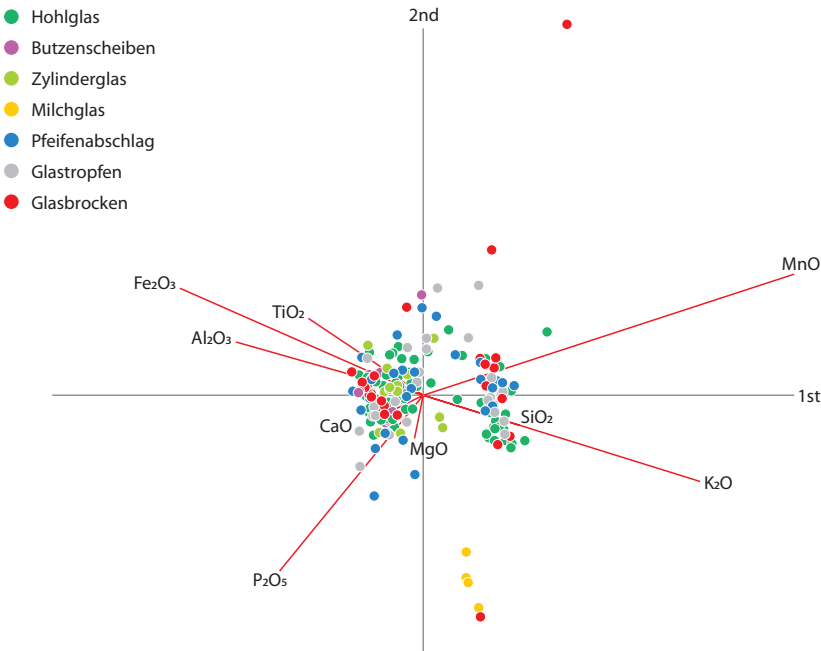
Pfeifenabschläge, Glastropfen und Glasbrocken gelten als Produktionsabfälle der lokalen Glasproduktion (Produktionsabfälle: n = 75; s. auch Abb. 72). Die nachfolgende PCA (Abb. 103–104) untersucht die Glasprodukte und die Produktionsabfälle (Hohl- und Flachglas + Produktionsabfälle: n = 197), wobei die kategoriellen Informationen in der PCA nicht berücksichtigt werden. Die Evidenz:

Die Analysedaten der Pfeifenabschläge, der Glastropfen und der Glasbrocken sind

praktisch deckungsgleich mit denjenigen der entsprechend bunten und farblosen Hohl- und Flachgläser. Die kalium- und manganreichere Gruppe (entlang der Hauptkomponente 1) entspricht dem Pottaschenglas (K-Ca-3), die aluminium- und eisenreichere Gruppe dem K-Ca-2-Glas (vgl. auch mit Abb. 76 und Abb. 105). Die Produktionsabfälle entsprechen somit chemisch exakt den Glasgefäßen. Das kann als ein sprechendes Indiz dafür genommen werden, dass alle vom Geochemischen Labor analysierten Hohl- und Flachgläser lokal vor Ort hergestellt worden sind. Ausser den Milchgläsern, die sich vor allem durch einen sehr hohen Phosphatgehalt ( $P_2O_5$ ) auszeichnen und von Christophe Gerber typologisch auch als auswärtige Produktion angesehen werden mögen (s. dazu auch chap. 2.1.5; 3.3.2.1 und Kap. 4.2.3.1, s. v. Erste Schlussfolgerungen; und insbesondere Abb. 85), gibt es keine (weiteren) Ausreisser. Im Gegenteil: Ein analysierter Glasbrocken entspricht chemisch den vier opakweissen Glasgefäßfragmenten. Somit dürfen wir davon ausgehen, dass sowohl die bunten wie die farblosen Gläser und wohl auch die Milchgläser allesamt lokal hergestellt worden sind.

Legt man den Fokus auf die Farben der Glasprodukte in Korrelation mit den Farben der diversen Produktionsabfälle, so fällt auf, dass die chemischen Analysewerte der bunten bzw. farblosen Produktionsabfälle weitestgehend denjenigen der gleichfarbigen Glasprodukte entsprechen, mit Ausnahme zweier bunter Pfeifenabschläge und zweier blauer Glasbrocken, die im Streubereich des Pottaschenglases liegen (Abb. 105). Solche Ausnahmen sind bereits unter den Glasprodukten belegt (s. z. B. Abb. 82).

Abb. 103: biplot von Hauptkomponenten 1 und 2 (s. auch Abb. 104) nach PCA (Principal Component Analysis) mit den gleichen chemischen Haupt- und Nebenkompenten wie in Abb. 76; jeweilige Farben der Hohlgläser und Produktionsabfälle nicht extra ausgewiesen, Symbole hier entsprechend Zeichenlegende in der Abbildung. Punkte: scores der Hauptkomponenten 1, 2. Vektorpfeile: loadings (relative Anteile der chemischen Elemente an der Bildung der Hauptkomponenten 1, 2).



Principal Components:										Cum. Prop.
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
PC1	0.1620	-0.3149	-0.4091	0.6236	-0.0147	-0.0776	0.4653	-0.1932	-0.2415	0.6427
PC2	-0.1090	0.1925	0.3868	0.4377	-0.1562	-0.0825	-0.3116	0.2780	-0.6358	0.7817
PC3	0.2340	-0.1451	-0.1242	-0.5005	0.0580	0.0244	0.3730	0.5462	-0.4656	0.9029
PC4	-0.1905	-0.2786	-0.3042	0.2350	-0.1797	-0.1315	-0.2387	0.6852	0.4029	0.9537
PC5	0.1133	-0.0651	0.4293	-0.0494	-0.7223	-0.2839	0.3895	-0.0159	0.2045	0.9763
PC6	-0.2470	0.7073	-0.3215	-0.0110	0.0479	-0.5145	0.2508	0.0713	0.0167	0.9907
PC7	0.3392	0.3865	-0.4193	-0.0041	-0.5352	0.4854	-0.1874	-0.0183	-0.0467	0.9978
PC8	-0.7555	0.0096	0.0230	-0.0023	-0.1346	0.5265	0.3598	0.0280	-0.0545	1.0000

Abb. 104: Hauptkomponenten (principal components) aufgrund von Kovarianzen; PCA (Principal Components Analysis) in Aitchison-Geometrie.

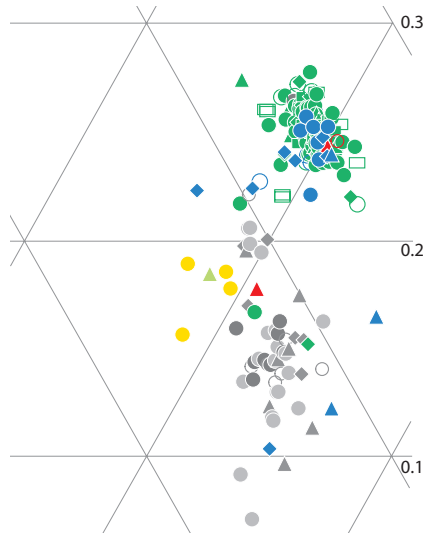
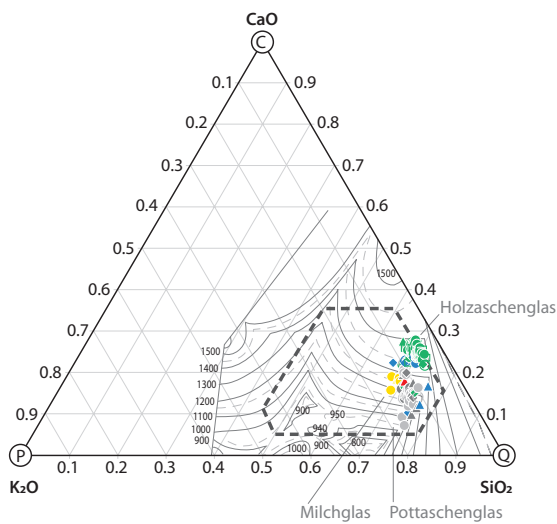


Abb. 105: ternary plot mit  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{CaO}$  mit den Analysen der Glasprodukte und Produktionsabfälle: Pfeifenabschlag (◆), Glastropfen (○), Glasbrocken (▲) von Court, Pâturage de l'Envers (zu den Symbolen s. auch Abb. 72); die Analysewerte sind hier nicht *clr*-transformiert; dem plot der Analysewerte sind das Schmelzdiagramm nach Morey/Kracek/Bowen (1930) und ein Trapezoid als Streubereich, in dem Glasdaten jeglicher Art üblicherweise plotten, unterlegt. Die zweite Grafik stellt eine Detailansicht des Streubereichs dar.

Weitere Stichproben (Abb. 106) bestätigen die chemische Kongruenz von Glasprodukten und Produktionsabfällen, inklusive der Berücksichtigung der Farben, durchwegs:

- Entsprechend haben die Produktionsabfälle blauer Farbe einen höheren Kobalt- und Bleigehalt.
- Die farblosen und filigranverzierten Glasgefäße haben generell einen höheren Antimongehalt (s. auch Kap. 4.2.3.2; und Abb. 100). Die farblosen Pfeifenabschläge, Glasbrocken und Glastropfen zeigen eine ähnliche Tendenz, wenn auch nicht durchgehend.
- Die blauen Gläser zeigen heterogene Manganwerte, ein Teil weist einen hohen Mangan Gehalt auf (Abb. 88–89), der sonst eher für farbloses und opakweisses Glas spricht. Der heterogene Eindruck wird durch die Untersuchung der Produktionsabfälle verstärkt (Abb. 106).

Ein einziger blauer Glasbrocken zeigt einen extrem hohen Mangan Gehalt (4.95 Gew.-%; s. auch den isolierten Wert entlang der Hauptkomponente 2 in Abb. 103). Dabei stellt sich die Frage, ob die als Glasbrocken klassifizierten Proben von Court, Pâturage de l'Envers durchwegs Abfall der Glasproduktion sind. Wenn ja, müssten sie die gegebenen Werte der Glasproduktion widerspiegeln. Bei dem einen blauen Glasbrocken scheint dies aber nicht der Fall zu sein. Ansonsten aber entsprechen die chemischen Werte der Glasbrocken mehrheitlich den chemischen Analysewerten der Glasprodukte.

#### 4.2.3.5 Fritte/Schlacke (YG + WBS)

«Die als Vorstufe zur Glasschmelze gebildeten und meist zusammengesinterten Silikate nennt man *Fritte*». <sup>325</sup> Die Fritte kann als Zwischenprodukt oder Halbfabrikat der Glasherstellung bezeichnet werden. Das Fritten bei 700 bis gegen 1000 °C dient einerseits der Entfernung von Carbonat ( $\text{CO}_2$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) aus den Ausgangsmaterialien der Glasherstellung, andererseits einer physikalischen Optimierung des nachfolgenden Schmelzprozesses: Das Gemenge von Sand und Asche wird durch Fritten homogenisiert, der Prozess der Kaliumsilikatbildung eingeleitet. Schliesslich dienen das Zerkleinern und das Aufmahlen der abgekühlten Fritte der Homogenisierung und der Korngrößenreduktion. Letztere dürfte bei der anschliessenden Schmelze zwischen 1100 und 1450 °C von Bedeutung sein. Daraus folgt, dass die Fritte chemisch dem späteren Glas entsprechen müsste, falls ihr beim Aufmahlen nicht Additive – wie beispielsweise Pigmente, Entfärbungsmittel, und so weiter – beigemischt worden sind.

In der Glasliteratur (u. a. Turner; Bezborodov; Wedepohl) <sup>326</sup> wie auch in literarischen Quellen (wie z. B. Plinius d. Ä., Theophilus, Antonio Neri [jeweils zitiert in der oben genannten Glasliteratur]) ist immer wieder die Rede von Fritten. Dies trifft insbesondere auch für das mittelalterliche Holzaschenglas zu.

Im Fundmaterial von Court, Pâturage de l'Envers findet sich eine Produktgruppe, die zunächst als Schlacke (*scories*), später als Fritte (s. chap. 3.3.4 und auch 3.3.2) angesprochen

<sup>325</sup> Wedepohl 2003, 3

<sup>326</sup> Turner 1956b; Bezborodov 1975, 94–96; Wedepohl 2003, 143.

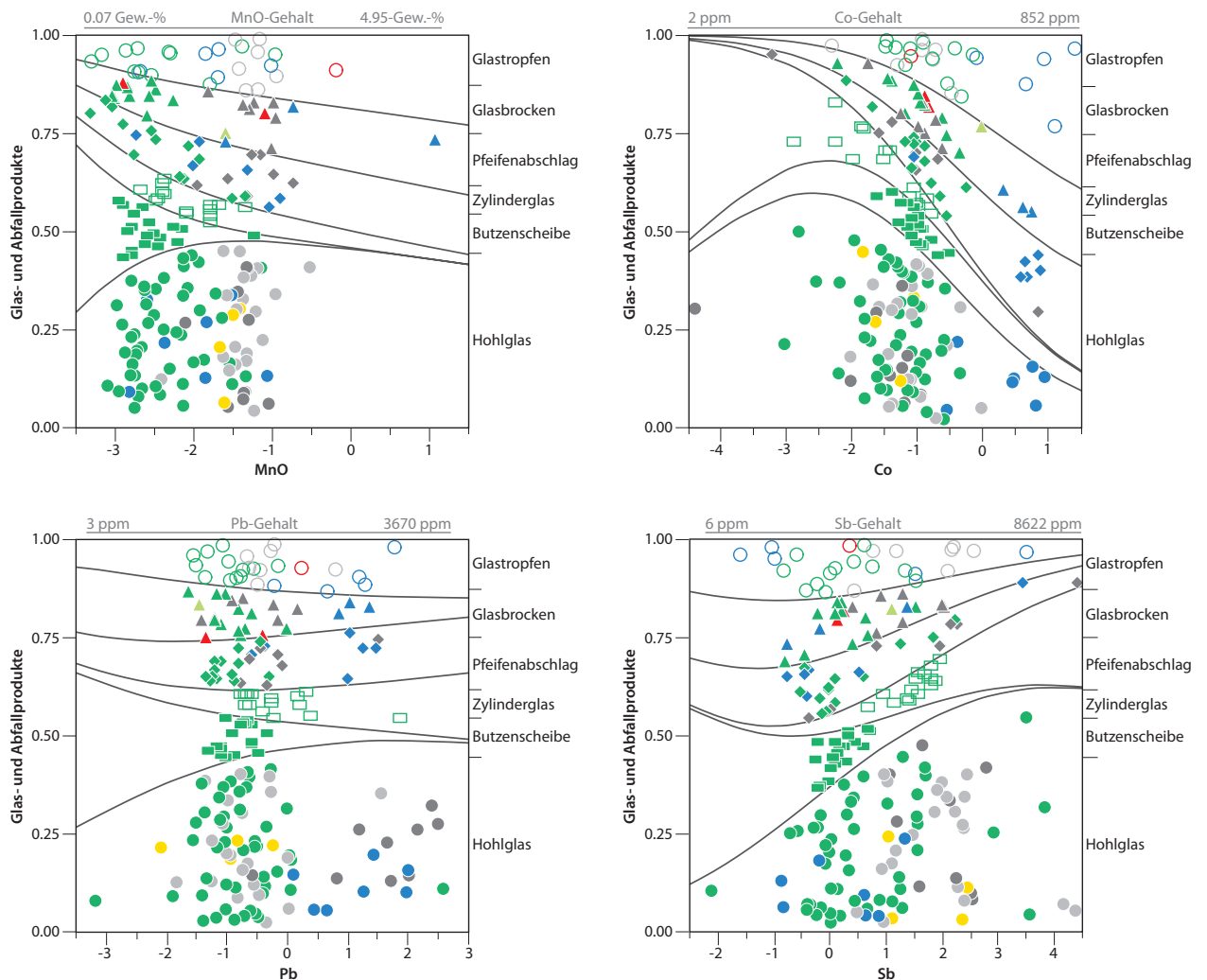


Abb. 106: Logistische Regression von MnO, Co, Pb, Sb versus Glasprodukte und Produktionsabfälle. Oben eingeblendet die Gew.-% und ppm-Intervalle des MnO, Co, Pb, Sb-Gehalts aller analysierten Glasprodukte und Produktionsabfälle.

wurde. Davon sollen 30 Proben in mehreren Übersichten den Hohl- und Flachgläsern und Produktionsabfällen gegenübergestellt werden (Abb. 107–108):

Wie bereits in Abbildung 103 dokumentiert, sind die chemischen Analysewerte der Glasprodukte und der Produktionsabfälle mehrheitlich chemisch deckungsgleich. Der manganreiche Glasbrocken wurde bereits diskutiert (Kap. 4.2.3.4; Abb. 106). Die kalium- und manganreichere Gruppe (entlang der Hauptkomponente 1) entspricht dem K-Ca-3-Glas, die aluminium- und eisenreichere Gruppe dem K-Ca-2-Glas (vgl. auch mit Abb. 76, 103 und 105). Die Hälfte der Fritten-Analysewerte plotten im Streubereich des K-Ca-2-Glases – keiner entspricht dem K-Ca-3-Glas –, die andere Hälfte plottet entlang der Hauptkomponente 2 und zeichnet sich durch höheren Aluminium- ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Titangehalt ( $\text{TiO}_2$ ) aus.

Die Diskriminanzanalyse, die Gruppen von Abbildung 107 berücksichtigend, unterscheidet die Kategorie Fritte deutlich von den anderen, wobei die Kategorien Hohl- (inklusive Milchglas) und Flachglas (Butzenscheiben und Zylinderglas) zu einer einzigen Kategorie zusammengefasst sind (Abb. 109):

In ihrer Streuung der Analysewerte klumpen die Hohl-, Flachgläser, Glastropfen, -brocken und Pfeifenabschläge – sie sind chemisch deckungsgleich –, differieren aber entlang der x-Achse signifikant von den Frittenproben. Die Diskriminanzanalyse nach fünf Kategorien weist über 50 % als «misclassified» (122 Proben [von Hohl- und Flachglas + Produktionsabfälle + Fritten:  $n = 229$ ]), was nicht erstaunt, denn chemisch sind die Gruppen der Glasprodukte und Produktionsabfälle praktisch gleich (s. auch Kap. 4.2.3.4). Somit entsprechen die Produktionsabfälle nicht einer chemisch fassbaren Unterscheidung. Fasst



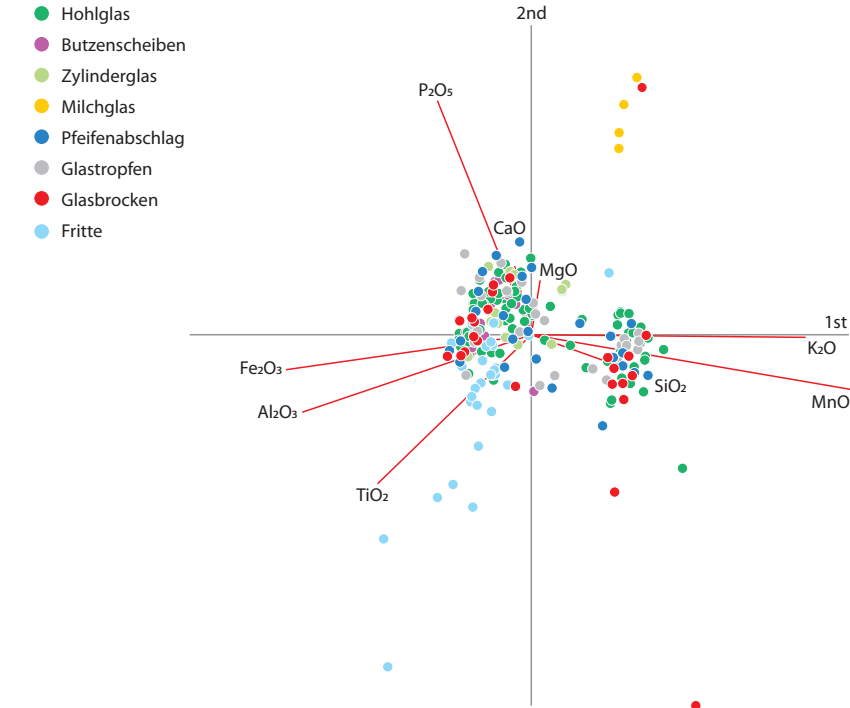


Abb. 107: *biplot* von Hauptkomponenten 1 und 2 (s. auch Abb. 108) nach PCA (Principal Component Analysis) mit den gleichen chemischen Haupt- und NebenkompONENTEN wie in Abb. 76 und 103; jeweilige Farben der Hohl- und Flachgläser, Produktionsabfälle und Fritten nicht extra ausgewiesen, Symbole hier entsprechend Zeichenlegende in der Abbildung. Punkte: *scores* der Hauptkomponenten 1, 2. Vektorpfeile: *loadings* (relative Anteile der chemischen Elemente an der Bildung der Hauptkomponenten 1, 2).

Principal Components:										Cum. Prop.
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	
PC1	0.1396	-0.3788	-0.4058	0.6136	0.0147	-0.0276	0.4539	-0.1553	-0.2543	0.6119
PC2	-0.0966	-0.2491	-0.1124	-0.2024	0.1749	0.2207	-0.0084	0.7524	-0.4791	0.7740
PC3	0.2837	-0.1946	-0.3122	-0.6464	0.0983	0.0195	0.4993	-0.0677	0.3200	0.8846
PC4	-0.1877	-0.2792	-0.3225	0.2294	-0.1657	-0.1024	-0.2548	0.3985	0.6844	0.9315
PC5	0.1058	0.6137	-0.3106	0.0119	-0.2753	-0.5333	0.1992	0.3154	-0.1269	0.9664
PC6	-0.1369	0.3399	-0.5672	0.0203	0.6412	0.1533	-0.2780	-0.1781	0.0054	0.9882
PC7	0.5273	0.1221	-0.2851	-0.0019	-0.4786	0.5385	-0.3166	-0.0321	-0.0737	0.9961
PC8	-0.6605	0.2458	-0.1034	-0.0191	-0.3240	0.4803	0.3890	-0.0552	0.0472	1.0000

Abb. 108: Hauptkomponenten (*principal components*) aufgrund von Kovarianzen; PCA (Principal Components Analysis) in Aitchison-Geometrie.

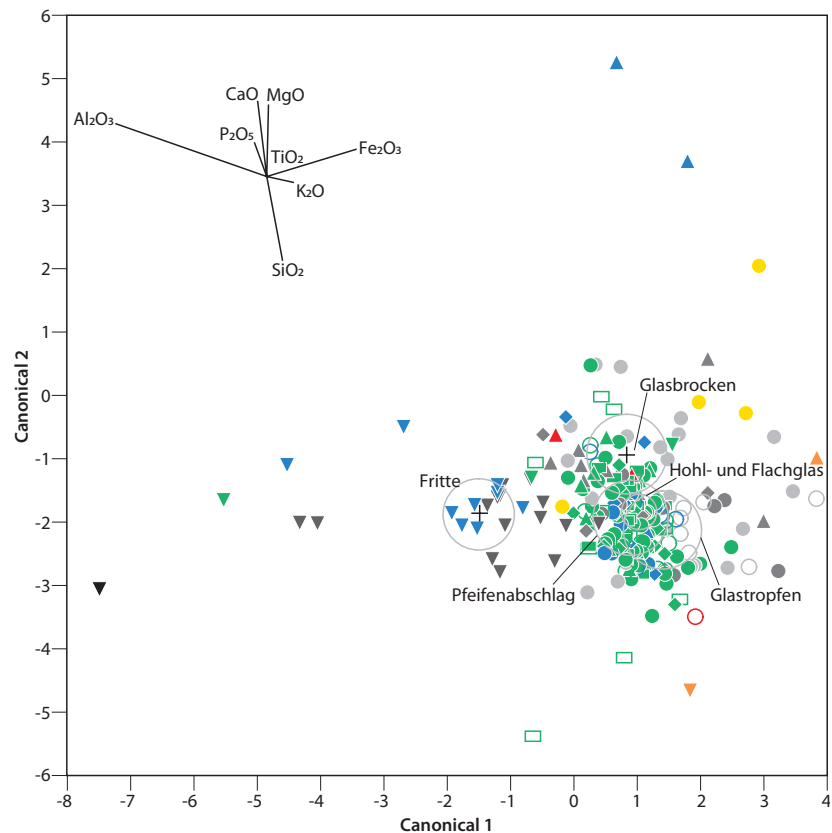
man die Glasprodukte und Produktionsabfälle zu einer *Gruppe* zusammen, bezeichnet als:  $\Rightarrow$  *non-Fritte*, dann werden nur noch 4 % als «falsch» klassifiziert (n = 9), das heisst nur fünf von 30 Frittenproben werden falsch zugewiesen (Abb. 110):

Aufgrund iterativer Identifikation der signifikantesten Variablen bei der Erstellung der Diskriminanzanalyse wurde die stärkste sinnvolle kanonische Korrelation bestimmt:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CaO}$  (Abb. 109–110). Mit diesen Komponenten gelang auch die Identifikation signifikanter *k*-means *cluster* (Abb. 111):

*Cluster 2* (orange markiert) entspricht dem K-Ca-3-Glas (*cluster 3* in Abb. 78), *cluster 1* (rot markiert) dem K-Ca-2-Glas (*cluster 1* in Abb. 78), beide *clusters* schliessen auch die Produktionsabfälle mit ein. *Cluster 3* (hellblau markiert) wird von den Frittenproben

gebildet, wobei der Aluminiumgehalt ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) massgebend ist (Abb. 112):

*K*-means *cluster 3* (Abb. 111) scheint sich in der konventionellen 2D-Projektion der beiden ersten Hauptkomponenten teilweise mit *cluster 1* zu überschneiden. Erst eine im Druck nicht sinnvoll reproduzierbare dynamische 3D-Projektion der mehrdimensionalen *cluster*-Analyse offenbart die *cluster*-Separation entlang der weiteren Komponenten. In der Diskriminanzanalyse (Abb. 109) wird deutlich, dass die chemischen *cluster* eine Erklärung für ungenügende Diskriminanz der Produktkategorien bieten. Aus Gründen der Redundanz wird im Folgenden nur die Korrespondenz der *cluster* und Produktkategorien gezeigt. Unverkennbar wird *cluster 3* recht homogen durch die Fritten bestimmt (Abb. 113):



Number Misclassified	123
Percent Misclassified	54.19
-2LogLikelihood	569.9

Counts: Actual Rows by Predicted Columns

	Pfeifenabschlag	Glasbrocken	Glastropfen	Hohl- und Flachglas	Fritte
Pfeifenabschlag	10	2	9	5	0
Glasbrocken	6	8	2	8	0
Glastropfen	3	3	14	5	0
Hohl- u. Flachglas	23	20	31	47	1
Fritte	2	1	1	1	25

Eigenvalue	Percent	Cum Percent	Canonical Corr
0.77937746	81.9070	81.9070	0.66181999
0.10193306	10.7124	92.6194	0.30414447
0.05474322	5.7531	98.3725	0.22781998
0.01548629	1.6275	100.0000	0.12349139

Test	Value	Approx. F	NumDF	DenDF	Prob>F
Wilks' Lambda	0.4761633	5.5333	32	794.48	<.0001*
Pillai's Trace	0.5976616	4.7868	32	872	<.0001*
Hotelling-Lawley	0.95154	6.3567	32	551.71	<.0001*

Standardized Scoring Coefficients

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
Canon 1	0.177083	-1.633734	0.9293848	0.1087242	-0.020082	-0.354787	0.2276496	-0.139695
Canon 2	-0.839252	0.6758565	0.2388697	-0.996641	0.8584801	2.3174426	0.053267	0.4082319

Abb. 109: *canonical correlation* einer linearen Diskriminanzanalyse (DA), Klassenzugehörigkeit aufgrund der exogenen Kategorien Glasprodukte, Produktionsabfälle (Pfeifenabschläge, Glastropfen, Glasbrocken) und Fritte (▼). Kreise entsprechen 95-%-Konfidenzintervall des Gruppenmittelwerts. *actual rows by predicted columns*: Abweichungen der Diskriminanzklassifikation von der *a-priori*- (exogenen) Kategorisierung.

Abb. 110: *canonical correlation* einer linearen Diskriminanzanalyse (DA), Klassenzugehörigkeit aufgrund der exogenen Kategorien Glasprodukte und Produktionsabfälle (zusammengefasst zu non-Fritte) versus Fritte. Kreise entsprechen 95%-Konfidenzintervall des Gruppenmittels. *actual rows by predicted columns*: Abweichungen der Diskriminanzklassifikation von der *a-priori*- (exogenen) Kategorisierung.

Number Misclassified	9
Percent Misclassified	3.965
-2LogLikelihood	79.19

#### Counts: Actual Rows by Predicted Columns

	non-Fritte	Fritte
non-Fritte	194	4
Fritte	5	25

Eigenvalue		Percent	Cum Percent		Canonical Corr
0.74574526		100.0000	100.0000		0.65358912
Test	Value	Approx. F	NumDF	DenDF	Prob>F
Wilks' Lambda	0.57282123	20.3216	8	218	<.0001*
Pillai's Trace	0.4271787	20.3216	8	218	<.0001*
Hotelling-Lawley	0.7457453	20.3216	8	218	<.0001*

#### Standardized Scoring Coefficients

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
Canon 1	-0.024709	1.6382576	-0.808747	0.1801208	-0.004005	0.2530895	-0.129614	0.212469
Canon 2	0.9351529	3.3900119	2.5606236	4.543028	2.285073	4.4639417	2.981691	2.724428

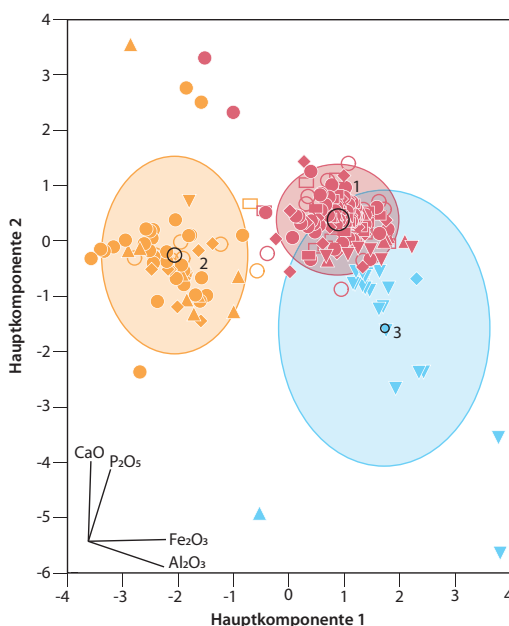
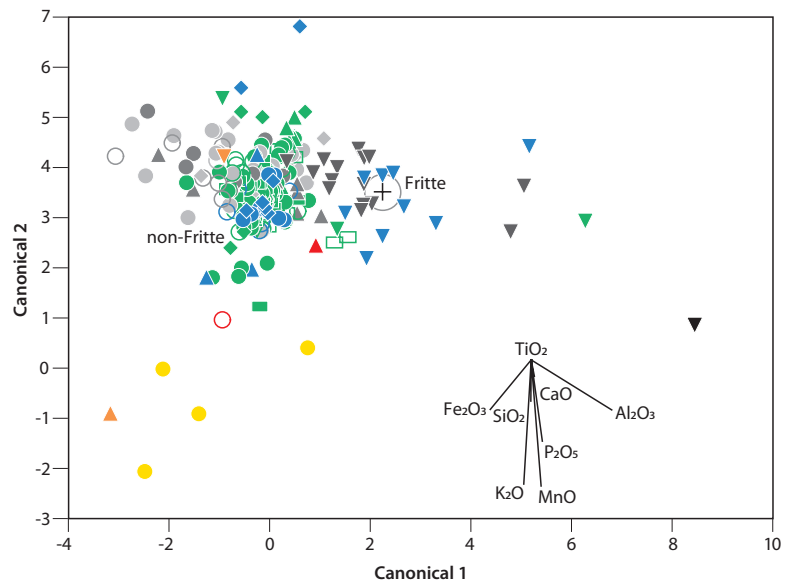


Abb. 111: *biplot* der *k*-means cluster, *K* = 3. Farbkodierung orange/rot/hellblau nur zur cluster-Identifikation, nicht exogenen Kategorien entsprechend. Referenzvektoren zur besseren Übersicht von Koordinaten [0,0] nach [-3.8,-5.5] verschoben. Kleine Kreise um cluster-Mittelpunkt: Kreisflächen proportional zur cluster-Größe (cluster 1: *n* = 143, cluster 2: *n* = 62, cluster 3: *n* = 22). Farbig schattierte Ellipsoide: 90 % Dichtebereich der cluster-Belegung; bei einer approximativ normalverteilten Streuung der Daten im cluster sollten 90 % der Punkte in diesem Bereich liegen.

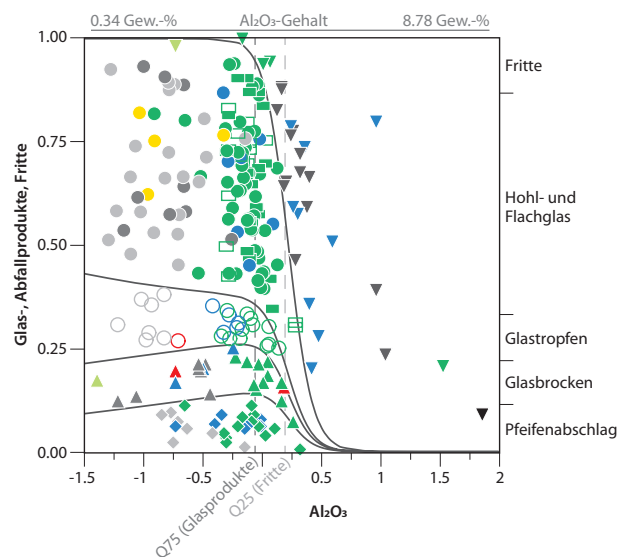
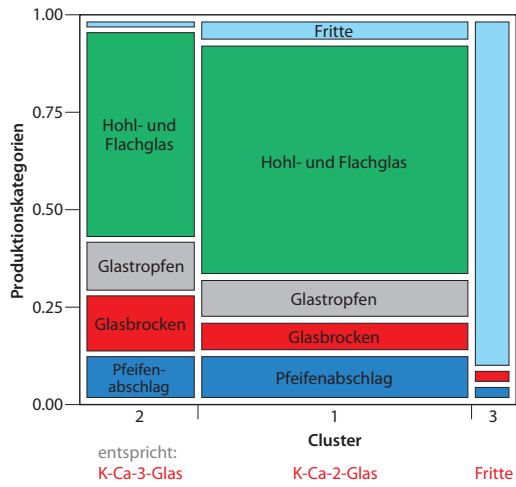


Abb. 112: Logistische Regression von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> versus Glasprodukte, Produktionsabfälle und Fritte; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) der Glasprodukte und der Fritte. Oben eingeblendet das Gew.-%-Intervall des Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalts aller analysierten Glasprodukte, Produktionsabfälle und Fritten.

Abb. 113: *mosaic plot* und zugehörige Kontingenztafel; *k-means clusters* (*a-posteriori*-Kategorien) von Abb. 111 werden den exogenen Produktionskategorien (*a-priori*-Kategorien) gegenübergestellt.



Cluster aufgrund Produktionskategorien

Cluster	Pfeifenabschlag	Glasbrocken	Glastropfen	Hohl- und Flachglas	Fritte	Total
1	8	10	9	34	1	62
2	17	13	16	88	9	143
3	1	1	0	0	20	22
Total	26	24	25	122	30	227

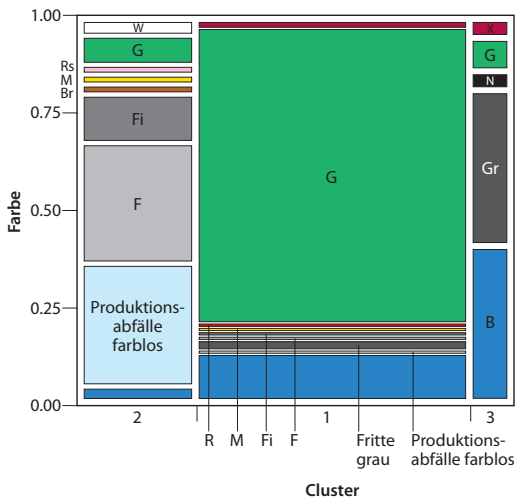
N	DF	-LogLikelihood	R <sup>2</sup> (U)
227	8	47.207776	0.1564

Test	$\chi^2$	Prob> $\chi^2$
Likelihood Ratio	94.416	<.0001*
Pearson	132.473	<.0001*

Abb. 114: *mosaic plot* und zugehörige Kontingenztafel; *k-means clusters* (*a-posteriori*-Kategorien) von Abb. 111 werden den Farbkategorien (*a-priori*-Kategorien; s. Abb. 72) gegenübergestellt.

Cluster by color

Cluster	B	Abfall, farblos	Fritte, grau	F	Fi	Abfall, braun	M	Fritte, schwarz	Abfall, rot	Abfall, rosa	G	weiss	Fritte, unbest.	Total
1	3	20	0	20	8	1	2	0	0	1	5	2	0	62
2	18	1	4	1	1	0	2	0	1	0	114	0	1	143
3	9	0	9	0	0	0	0	1	0	0	2	0	1	22
Total	30	21	13	21	9	1	4	1	1	1	121	2	2	227



N	DF	-LogLikelihood	R <sup>2</sup> (U)
227	24	116.65952	0.3242

Test	$\chi^2$	Prob> $\chi^2$
Likelihood Ratio	233.319	<.0001*
Pearson	260.532	<.0001*

Die Fritte zeigt ganz unterschiedliche Farben, auch solche, zu denen man im Endprodukt keine Entsprechung findet. Neben grünen und blauen Glasfrittefragmenten finden sich auch weisse, schwarze und in grosser Zahl graue, aber keine farblosen (Abb. 114):

Bei einer ersten Durchsicht der Frittefragmente mag man den Eindruck gewinnen, dass die graue Fritte zum Ansatz der farblosen Glasschmelze verwendet worden sein könnte

(Abb. 115). Interessanterweise zeigen alle Glasfritten (von grün bis grau) einen niedrigen Kaliumgehalt ( $K_2O$ ). Auch die grauen Glasfritten, die vielleicht für farbloses Glas hätten verwendet werden können, zeigen auf dieser Stufe der Produktion einen Kaliumgehalt, der sich von den bunten Glasprodukten und Fritten in nichts unterscheidet. Es ist unsinnig und auch analytisch nicht nachweisbar anzunehmen, dass bei der Produktion der farblo-



sen Gläser erst beim Ansatz der finalen Glasschmelze die Pottasche zugefügt worden sei. Vielmehr müsste man schlussfolgern, dass die Herstellung von Pottaschenglas kein vorheriges Fritten erforderte.

Auch bei einer vermeintlichen Zugabe von Manganoxid (MnO) darf man vermuten, dass Braunstein, wenn überhaupt, erst der finalen Glasschmelze, nach dem Fritten, zugegeben worden wäre (s. dazu auch Kap. 4.2.3.1, s. v. Exkurs: Manganoxid in der Glasproduktion; Abb. 116):

Ausser einer weissen Glasfritte haben alle Glasfrittenproben einen durchwegs niedrigen Mangangehalt (MnO).

Folgt man jedoch der obigen Argumentation, dass die Fritte chemisch dem späteren Glas entsprechen müsste, müsste die Summe der glasbildenden Rohmaterialien  $\text{SiO}_2$ , CaO und  $\text{K}_2\text{O}$  von Fritte und aus ihr hergestelltes Glas identisch sein (Abb. 117):

Die Gegenüberstellung der als Fritte bezeichneten 30 Proben von Court, Pâturage de l'Envers mit den Glasproben zeigt aber einen wesentlichen Unterschied. Die Summe der Glasbildner liegt beim analysierten K-Ca-2-Glas zwischen 90 bis 94 Gew.-%, beim K-Ca-3-Glas zwischen 93 bis 97 Gew.-%, bei den Fritten aber zwischen 88 bis 93 Gew.-%. Der Unterschied wird wesentlich durch  $\text{Al}_2\text{O}_3$  verursacht: 1 bis 3 Gew.-% im K-Ca-2-Glas, 0,2 bis 1 Gew.-% im K-Ca-3-Glas und 2,5 bis 8 Gew.-% in der Fritte. Dieser Sachverhalt widerspricht der oben ausgeführten Darlegung. Zudem ist die nach Morey/Kracek/Bowen (1930) berechnete Schmelztemperatur der Fritte mit 1400 °C um 40 °C höher als jene des mittleren K-Ca-2-Glases. Die als Fritte angesprochenen Proben entsprechen nicht dem Halbfabrikat, sondern scheinen zu einem anderen Teil des Glasproduktionsprozesses zu gehören – welchem? Tatsächlich waren diese Proben in einem ersten Bestimmungsprozess als *scories* (Schlacken) angesprochen worden.

Gemäss *Larousse* lautet die metallurgische Definition von *scorie*: «sous-produit d'élaboration métallurgique, ayant une forte teneur en silicates et oxydes métalliques. (Certains scories sont recyclées en raison de leur teneur en oxydes [...]).»<sup>327</sup>

Übertragen auf den Glasherstellungsprozess entspräche dies einem sich im Glashafen

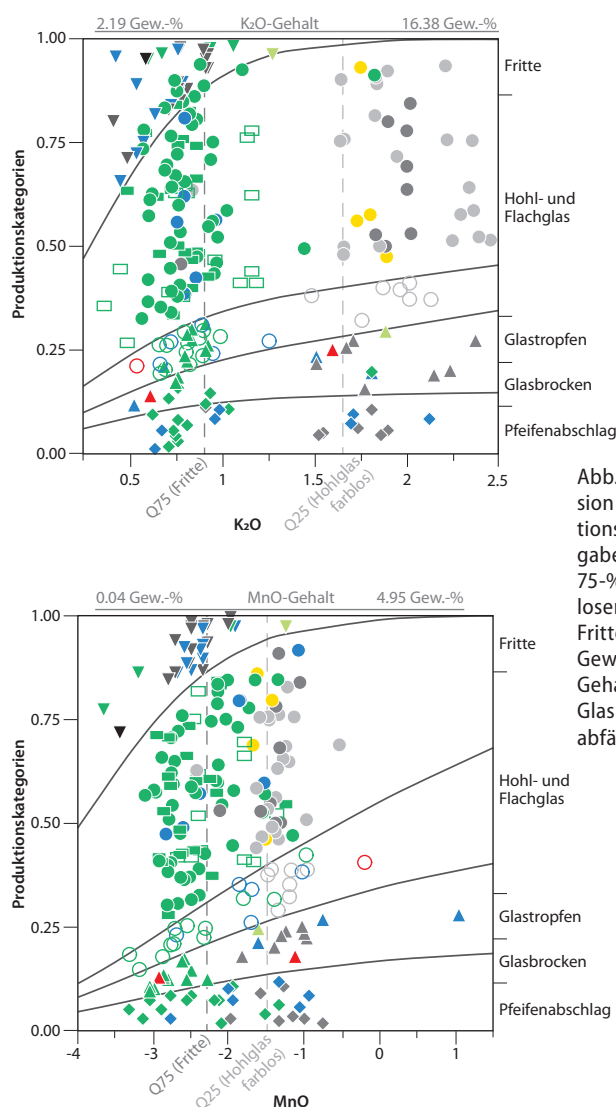


Abb. 115: Logistische Regression von  $\text{K}_2\text{O}$  versus Produktionskategorien;  $\text{K}_2\text{O}$  mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) der farblosen Hohlgläser (F) und der Fritte. Oben eingeblendet das Gew.-%-Intervall des  $\text{K}_2\text{O}$ -Gehalts aller analysierten Glasprodukte, Produktionsabfälle und Fritten.

über der Schmelze bildenden, zähen, aluminium- und siliciumreichen, hochschmelzenden Schaum (ähnlich der bekannten Galle, aber nicht aus Kaliumsulfat oder Kaliumchlorid [= «Galle»] bestehend<sup>328</sup>). Abgeschöpft und erkaltet könnte er einer blasigen Lava ähneln. Der erhöhte Aluminiumgehalt könnte aus der keramischen, feuerfesten Masse der Hafengewandung stammen und wäre als Folge eines Auslaugungsprozesses zu verstehen (dagegen Maus/Jenisch<sup>329</sup>) oder aber als Abscheidungs-/Entmischungsprozess der Schmelze selbst<sup>330</sup> (Bildung eines aluminiumreicheren, höher schmelzenden Glasanteiles an der Oberfläche der Schmelze). In beiden Fällen wäre die Projektion der Glasbildner  $\text{SiO}_2$ , CaO,  $\text{K}_2\text{O}$  von Fritte und Glas in der ternären Darstellung ähnlich oder gleich. Dies trifft für K-Ca-2 (Waldglas) und Fritte tatsächlich zu.

Abb. 116: Logistische Regression von MnO versus Produktionskategorien; MnO mit Angabe der 25%- (Q25) bzw. 75%-Quantile (Q75) der farblosen Hohlgläser (F) und der Fritte. Oben eingeblendet das Gew.-%-Intervall des MnO-Gehalts aller analysierten Glasprodukte, Produktionsabfälle und Fritten.

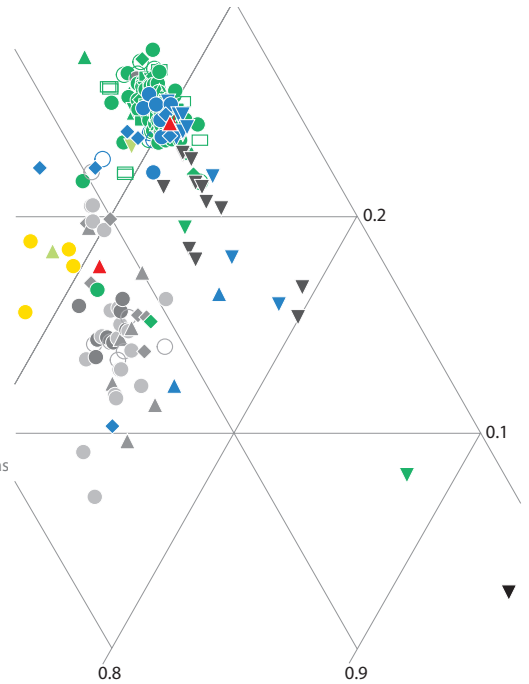
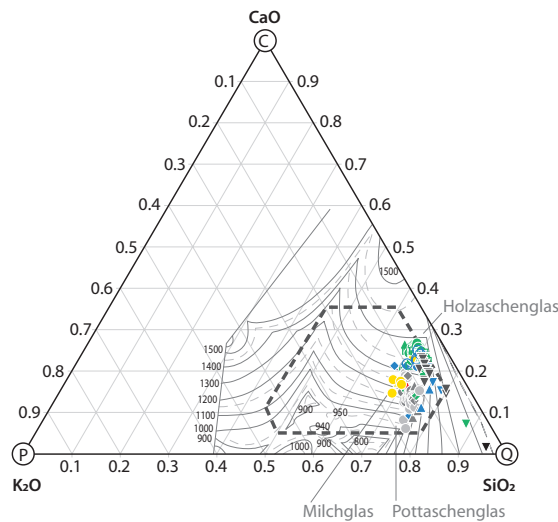
327 <http://www.larousse.fr>. Webster's (1995) definiert *scoria* als «rough, vesicular cindery lava», bzw. als «slag, or refuse from melting of metals».

328 Vgl. Sandever in Frank 1982.

329 Maus/Jenisch 1997/98, 383–384.

330 Siehe dazu Ullmann 1919, 229–230.

Abb. 117: *ternary plot* mit  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{CaO}$  mit den Analysen der Glasprodukte, Produktionsabfälle und Fritte (nicht *clt*-transformiert) von Court, Pâturage de l'Envers; dem plot der Analysewerte sind das Schmelzdiagramm nach Morey/Kracek/Bowen (1930) und ein Trapezoid als Streubereich, in dem Glasdaten jeglicher Art üblicherweise plotten, unterlegt. Die zweite Grafik stellt eine Detailansicht des Streubereichs dar.



Die Laborexperimente zur Herstellung von Glas aus lokalen Ausgangsmaterialien wurden nicht in Keramikgefäßen, sondern in Platingoldtiegeln vorgenommen, ein Fritten fand nicht statt. Die Bildung einer aluminiumreichen Galle war nach dem oben ausgeführten somit nicht zu erwarten und wurde auch nicht beobachtet. Es bleibt zukünftigen Experimenten vorbehalten, mehr Licht in die Bedeutung des Frittens und in die Beschaffenheit der Glasgalle *sensu lato* zu bringen.

Die Frage bleibt, ob in der Glashütte von Court, Pâturage de l'Envers tatsächlich eine zweistufige Glasproduktion stattgefunden hatte und ob bzw. wie sie archäologisch nachweisbar ist. Das wirft weitere Fragen auf: Musste bei der mittelalterlichen Glasproduktion immer zuvor gefritten werden? Wedepohl erwähnt, dass Glasschmelzen nicht immer zweistufig über ein Frittestadium erfolgt sein müsse, sondern dass es ebenso von der Reinheit der Rohstoffe abhängen könne.<sup>331</sup> Unter dieser Prämisse darf vermutet werden, dass zumindest das K-Ca-3-Glas dank der mehrheitlich «reinen» Pottasche nicht das Frittezischenstadium durchlaufen musste, wobei der Mehraufwand für die Pottaschengewinnung durch das Auslassen des Frittezischenstadiums wettgemacht worden sein dürfte. Für das K-Ca-2-Glas mag man ein Fritten zwischendurch annehmen.

## 4.2.4 Schlussfolgerungen

Yvonne Gerber und Willem B. Stern

### 4.2.4.1 Zwei chemisch unterschiedliche Glasgruppen – zwei Technologieprozesse

Die Glasanalysen und ihre statistischen Auswertungen ergeben deutlich zwei unterschiedliche chemische Glasgruppen. Alle bunten Hohl- und grünstichigen Flachgläser zeichnen sich durch einen niedrigen  $\text{SiO}_2$ -Gehalt, aber einen höheren  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - und einen deutlich höheren  $\text{CaO}$ -Gehalt aus (s. auch Abb. 79, 93–94). Der  $\text{K}_2\text{O}$ -Gehalt ist im Vergleich zur zweiten Gruppe durchwegs niedriger, der  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalt aber höher (> 1 Gew.-%). Die farblosen und opakweissen Gläser hingegen weisen einen höheren  $\text{SiO}_2$ -,  $\text{K}_2\text{O}$ - und  $\text{MnO}$ -Gehalt auf und mit Ausnahme der Milchgläser einen erkennbar geringeren  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Anteil (< 1 Gew.-%).<sup>332</sup>

Die bunten Gläser sind Vertreter des sogenannten Holzaschenglas (K-Ca-2; s. auch Abb. 83–84). Die Analysewerte der farblosen und weisslichen Gläser kennzeichnen das sogenannte Pottaschenglas (K-Ca-3).

Der chemische Unterschied ist durch die Andersartigkeit des Flussmittels bedingt. Das Holzaschenglas ist das Produkt eines Gemen-

<sup>331</sup> Wedepohl 2003, 3.

<sup>332</sup> Argumentation zum  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalt als Kriterium für Pottaschenglas, s. Stern/Gerber 2009.

ges aus bloss zwei Komponenten: Quarzsand und Holzasche, die sowohl den Netzwerk-wandler wie auch -stabilisator liefern. Das Pottaschenglas jedoch besteht aus drei Komponenten: Quarzsand, Holzaschenextrakt, Pottasche genannt ( $K_2CO_3$ ), und Kalk als Stabilisator.

Die Herstellung von farblosem Glas in Court, Pâturage de l'Envers setzte einen anderen technologischen Prozess zur Gewinnung des Flussmittels voraus. Abb. 84 (oben) gibt einen Überblick über die chemische Zusammensetzung der unterschiedlichen Glastypen und deren Flussmittel. Das Pottaschenglas enthält wegen des Extraktionsprozesses der Holzasche wenig färbende Komponenten. Die leicht löslichen Kalisalze lassen sich von den schwerer löslichen eisen- (Fe), magnesium- (Mg), calcium- (Ca) und phosphorhaltigen (P) Komponenten und Silikaten leicht abtrennen. Potentiell färbende Bestandteile (wie Mg, Fe) verbleiben somit im Extraktionsrückstand.

Die Herstellung von Pottasche war ein zusätzlicher Aufwand in der Waldglasproduktion. Auch in den Glashütten des Schwarzwaldes ist Pottaschenglas nachgewiesen.<sup>333</sup> Farbloses Glas, sogenanntes *crystallo* (auf der Basis von Natronglas), war seit der Mitte des 15. Jahrhunderts aus Venedig bekannt.<sup>334</sup> Farbloses Glas war seitdem erwünscht und hoch im Kurs, sicherlich im Kontext von Repräsentation und Tischservice. Der Import aus Venedig mag teuer gewesen sein. Noch im Mittelalter entstanden ausserhalb von Venedig und jenseits der Alpen Werkstätten, die Gläser venezianischer Art (*à la façon de Venise*) herzustellen versuchten.<sup>335</sup> Seit dem ausgehenden 17. Jahrhundert erwuchs der venezianischen Glasindustrie eine ernst zu nehmende Konkurrenz durch südböhmische Hütten. Die mittlerweile in Böhmen entwickelte hochwertige Kristallglasmasse auf Pottaschebasis (K-Ca-3-Glas) war dem zur Gruppe der Natron(-Kalk)-Gläser gehörenden venezianischen «*crystallo*» überlegen.<sup>336</sup> Der Ausstoss der mittelalterlichen deutschen Glashütten war mehrheitlich grünstichiges Glas. Mit der Produktion von Pottaschenglas in Court, Pâturage de l'Envers wollte man sicherlich der immer noch grossen Nachfrage nach farblosem Glas nachkommen. Die Produktion des Pottaschenglases mag wegen des grösseren Aufwandes der Pottascheherstellung teurer gewe-

sen sein als die üblichen bunten Gläser, doch sicherlich immer noch günstiger als allfälliger Import von venezianischem Glas aus Venedig, das trotz qualitativer Konkurrenz nach wie vor als begehrter «Markenartikel» gegolten haben dürfte. Die Vorrangstellung des venezianischen Glases ging im Verlauf des 18. Jahrhunderts definitiv zu Ende.

Die Produktion des farblosen Glases, teilweise filigranverziert, in Court, Pâturage de l'Envers war recht hochwertig/qualitativ, aber selbstverständlich nicht vergleichbar mit dem sogenannten *vetro crystallo* aus Venedig selbst.<sup>337</sup> Es war zwar ersichtlich, dass es nicht die hochstehenden Produkte aus Venedig waren, aber sie dürften in vielen Haushalten adäquaten Ersatz geboten haben. Die farblosen Gläser sind nicht auf eine bestimmte Gefässkategorie beschränkt, das ganze Gefässspektrum war sowohl als buntes wie auch als farbloses Glas bzw. Glas *à la façon de Venise* hergestellt worden (s. Abb. 90–92). Erst die Analysen einer Vielzahl von Glasfragmenten, aber auch von Produktionsabfällen vor Ort belegen, dass alle Gläser Kaliumgläser/Holzaschen-gläser sind und dass sie wohl alle lokal produziert worden sind (zu den Milchgläsern, s. Diskussion in Kap. 4.2.3.1, s. v. Erste Schlussfolgerungen). Dank des technologischen Wissens, dass man Pottasche mit wenig färbenden Bestandteilen als Flussmittel verwendete, konnte dem hohen Anspruch von farblosem, filigranem Glas entsprochen werden. Nur mit dem Zusatz von Braunstein wäre solch eine erfolgreiche «Entfärbung» wahrscheinlich nicht möglich gewesen.

Die Produktion von farblosem Glas vor Ort erstaunt umso mehr, als dass man zu Beginn der Analysen durchaus auch mit der Hypothese gerechnet hatte, dass die farblosen Glasfragmente Natriumglas sein könnten und dass sie als Bruchglas von nahen, grösseren Stadtzentren eingesammelt und zum Wiedereinschmelzen nach Court gebracht worden seien. Interessanterweise finden sich in Court, Pâturage de l'Envers zumindest unter den analysierten Scherben, keine chemischen «Misch»gefässe, das heisst Glasprodukte, bei denen der Holzaschenglascharge recyceltes Natriumglas beigemischt worden war. Ein Verfahren, das durchaus denkbar wäre, wie beispielsweise im Schwarzwald.<sup>338</sup>

333 Maus/Jenisch 1997/98, 331; 411.

334 Verità 1985; Verità 2007.

335 Dreier 1989; Dreier 2010; Lima et al. 2012, 1245.

336 Dreier 2010, 243; Cílová/Woitsch 2012; vgl. auch Ullmann 1957.

337 Der Katalog der Gläser ist im Band 4 ausführlich diskutiert.

338 Maus/Jenisch 1997/98, 420–421.

Alle Beobachtungen, Indizien und Argumente zusammennnehmend lassen eindeutig die Schlussfolgerung zu, dass aller Glasbruch, inklusive den Produktionsabfällen, die vor Ort gefunden worden sind, von lokaler Produktion ist, und zwar die bunten wie auch die farblosen und *à-la-façon-de-Venise*-Gläser.

#### 4.2.4.2 Exkurs: Glasröhrchen mit weisser Füllung

In der Fülle des Fundmaterials fanden sich auch 3 bis 5 mm dünne Röhrchen aus farblosem Glas, deren Ende teilweise flach zuge-drückt ist (s. Abb. 73 und chap. 3.3.1). Der Inhalt der Röhrchen besteht aus einer weis-slichen Masse, die im Geochemischen La-bor mittels Mikrosonde, energie-dispersiver Röntgenfluoreszenzspektrometrie (ED-XRF) und Röntgendiffraktometrie (XRD) unter-sucht worden ist (vgl. auch Kap. 4.2.2). Die weisse Füllung der Röhrchen ist sehr hart und lässt sich relativ schwer beproben. Mit der Mi-krosonde war Antimon nachweisbar, während die XRD-Aufnahme als einzige klar identifi-zierbare kristalline Komponente Calcium-Antimonat (JCPD Code 26-0293;  $\text{Ca}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$ ) ausweist. Die chemische Analyse des Röhr-cheninhalts (Abb. 118) zeigt einerseits die zu K-Ca-3-Glas gehörigen Komponenten (links vom vertikalen Strich), andererseits zwei als Färbungs-/Trübungsmittel anzusprechende Elemente, nämlich Antimonoxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) und Bleioxid ( $\text{PbO}$ ). Calcium-Antimonat ist als weisses Trübungsmittel bekannt.<sup>339</sup>

Dieser Ansatz zur weissen Einfärbung von Glas in der abgeschiedenen Glashütte von Court, Pâturage de l'Envers findet Entspre-chung in der venezianischen Glasproduktion. Die Herstellung von Calcium-Antimonat für partielle Einfärbung/Trübung von Glas kam in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts in Venedig wieder auf. Ein Rezeptbuch eines vene-zianischen Glasmachers (erste Hälfte des 17. Jhs.) beschreibt seine Zubereitung: (Soda-) Asche wurde mit Kieselsteinen, Minium (Blei-oxid,  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ) und Antimon bei relativ niedriger Temperatur während circa 8 Stunden erhitzt. Als Ergebnis der chemischen Reaktion zwis-chen Calciumoxid (aus der [Pflanzen-]Asche) und Antimon bildeten sich Calicum-Antimo-nat-Kristalle. Diese «weisse Fritte» wurde –

in Venedig – der farblosen Glascharge zuge-geben, um durch Antimon getrübbtes, weisses Glas herzustellen.<sup>340</sup> Während es in Venedig natriumhaltige Pflanzenasche war, dürfte in Court, Pâturage de l'Envers die ganze Rezep-tur mit Baum-/Holzasche durchgeführt wor-den sein. Es darf vermutet werden, dass sie dem K-Ca-3-Glas zugefügt worden ist.

#### 4.2.4.3 Glasmacherei im Schwarzwald (12. bis 19. Jahrhundert)

Maus/Jenisch haben 328 Analysen von Glas-streifunden aus dem Schwarzwald vorge-legt.<sup>341</sup> Als Hinweis für den Standort eines Produktionsbetriebes galt die gleichzeitige Anwesenheit von Glas-, Hafen-, Ofen- und Rohglasbruch an demselben Ort. Die Auto-ren klassifizieren Wald-/Kaliglas, Natron- und Mischglas, und differenzieren konse-quent – so möglicherweise erstmals in der Literatur – zwischen Kaliglas aus integra-ler Baumasche (knapp die Hälfte der analy-sierten Gläser; Zeitstellung 12.–19. Jh.) und Kaliglas aus Aschenextrakt (gut ein Fünftel). Erste Pottaschengläser tauchen im Schwarz-wald schon um 1300 auf, mehrheitlich aber ab dem ausgehenden 17. Jahrhundert.<sup>342</sup> Das Schwarzwaldglas scheint überwiegend mit Bu-chenasche hergestellt worden zu sein.

Zum Zeitpunkt der chemischen Analy-sen der Gläser von Court, Pâturage de l'Envers und ihrer ersten Auswertung waren den Auto-ren die Analysen von Maus/Jenisch nicht be-kannt. Tatsächlich eignen sie sich für einen Vergleich mit dem Juraglas nur sehr bedingt, weil sie:

1. nicht von einem geschlossenen Standort resp. einer fachgerechten archäologischen Grabung stammen, sondern Oberflächen-funde darstellen, und
2. keine einheitliche Produktion und/oder Produktionszeit repräsentieren.

Weitere Unterschiede von Bedeutung sind:

3. Die analysierten Gläser von Court sind aus lokalen Rohstoffen vor Ort hergestellt (s. auch Kap. 4.3.1). Maus/Jenisch können dies ebenso für die Schwarzwaldgläser be-legen. Der Hochschwarzwald besteht aber aus silikatischen Gesteinen mit sauren Bö-den, und die auf solchem Substrat wach-senden Bäume zeigen eine entsprechend

339 Wedepohl 2003, 27–28; 33.

340 Lima et al. 2012, 1240–1242.

341 Maus/Jenisch 1997/98.

342 Zur Pottasche, s. Maus/Je-nisch 1997/98, 369–370; 417–418.



Chemische Haupt- und NebenkompONENTEN und Spurenelemente (Gew.-%)											
Court, Pâturage de l'Envers	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Fnr. 78258-112	0.84	0.96	0.55	37.7	0.32	10.7	26.6	0.27	0.66	0.9	
											Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
											14.3
											PbO
											5.1

Abb. 118: Chemische Zusammensetzung (Haupt- und NebenkompONENTEN und Spurenelemente in Auswahl) der weissen Füllung in einem der Glasröhrchen von Court, Pâturage de l'Envers. Analysresultate mittels ED-XRF, kleinste Pulvermenge auf «Criminal tape».

andere Asche als Bäume, die auf Kalkboden (wie in Court) wachsen. Die Unterschiede sind gross (vgl. hierzu Kap. 4.1.3; 4.3.1). Die Analysen der Buchenasche und Pottasche vom Schwarzwald weisen andere Werte auf als diejenigen von Court.<sup>343</sup>

4. Die Gläser von Court stammen, im Gegensatz zu den Schwarzwaldgläsern, aus einer kurzen Betriebszeit und sind stofflich homogen. Die Schwarzwaldgläser sind notgedrungen (s. Gründe dafür oben) stofflich heterogener.

Interessant ist aber, dass in der Neuzeit auch im Schwarzwald neben eigentlichem Waldglas Pottaschenextraktglas hergestellt worden ist. Solches scheint auch in Frankreich (dort schon früher: 13.–17. Jh.), nicht aber in England hergestellt worden zu sein. Die Gegenüberstellung von Glasanalysen von Court, Pâturage de l'Envers und 340 Glasanalysen aus der Literatur zeigen ihre stoffliche Homogenität in deutlicher Weise<sup>344</sup> (Abb. 119).

## 4.3 Die Rohmaterialien

Willem B. Stern

### 4.3.1 Die Rohmaterialien der Glasherstellung in Court, Pâturage de l'Envers

Die naturwissenschaftliche Identifizierung und Beschreibung von Rohmaterialien, die in einem historischen Fertigungsprozess eine Rolle gespielt haben könnten, hat mit einem grundsätzlichen Problem zu kämpfen. Was früher gewonnen worden und in einem technischen Prozess verarbeitet worden ist, fehlt heute im ehemals natürlichen Umfeld.

Eine Tonlagerstätte, deren Ton zu Keramik verarbeitet worden ist, ist teilkonsumiert, der verbleibende Teil nicht notwendigerweise

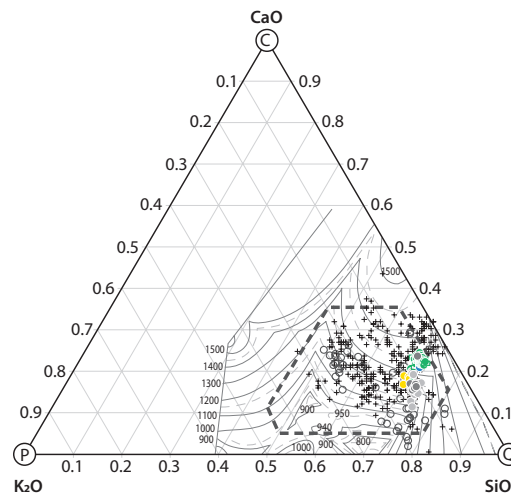


Abb. 119: Ternary plot mit SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O und CaO mit den Glasanalysen (nicht *cl/r*-transformiert) von Court, Pâturage de l'Envers versus 340 Glasanalysen aus der Literatur: Kali-/Waldglas (+), Pottascheglas (O). Quelle: siehe dazu Stern/Gerber (2009) 111; 118 Tab. 4; dem plot der Analysewerte sind das Schmelzdiagramm nach Morey/Kröckel/Bowen (1930) und ein Trapezoid als Streubereich, in dem Glasdaten jeglicher Art üblicherweise plotten, unterlegt.

identisch mit dem seinerzeit abgebauten Ton. Bezogen auf die historische Glasherstellung ist damit zu rechnen, dass der heute in Hüttennähe angetroffene Quarzsand nicht identisch ist mit dem seinerzeit vorhandenen. Es scheint in jedem Fall ratsam, mehrere Sandproben zu nehmen und deren stoffliche Variationsbreite zu prüfen.

Schwieriger noch ist die Charakterisierung der Holzasche, die seinerzeit für die Glasbereitung verwendet worden ist: Wenn heute in der Nähe von Court, Pâturage de l'Envers Buchen und Nadelhölzer wachsen, können wir deren Holz verbrennen und die Asche chemisch und mineralogisch analysieren und auf Brauchbarkeit für die Glasherstellung experimentell prüfen. Aber sind die heutigen Verhältnisse auf das frühe 18. Jahrhundert übertragbar?<sup>345</sup> Oder müssen wir davon ausgehen, dass allenfalls auch Nadelholz verwendet wurde, das vielleicht eine ähnliche Asche wie die Buche geliefert haben könnte? Und ist davon auszugehen, dass lediglich Holz aus der Nähe der Glashütte zur Aschenproduktion verwendet wurde, oder ist vielleicht nach Köhlerart dezentral im angrenzenden Jura «Ascherei» betrieben worden und ist die im Verhältnis zum Holz relativ geringe notwendige Aschenmenge möglicherweise über kleinere oder mittlere Distanzen zur Glashütte transportiert worden?

<sup>343</sup> Stern/Gerber 2009, 115 Tab. 2.

<sup>344</sup> Vgl. dazu auch Stern/Gerber 2009, 112 Abb. 1a–1b; 118 Tab. 4.

<sup>345</sup> Vgl. Brombacher 2010; Schlumbaum 2010; Wick 2010.

Abb. 120: Buchenaschen unterschiedlicher Herkunft aus der Literatur (vgl. Wolff 1871; Maus/Jenisch 1997/98). Die Aschenzusammensetzung einzelner Pflanzenteile kann in weiten Grenzen variieren, bedingt vor allem durch die Art des Substrates (kalkreich, tonig, mergelig, quarzreich). L = Stamm-/Scheitholz, T = Äste, B = Borke/Rinde, F = Blätter.

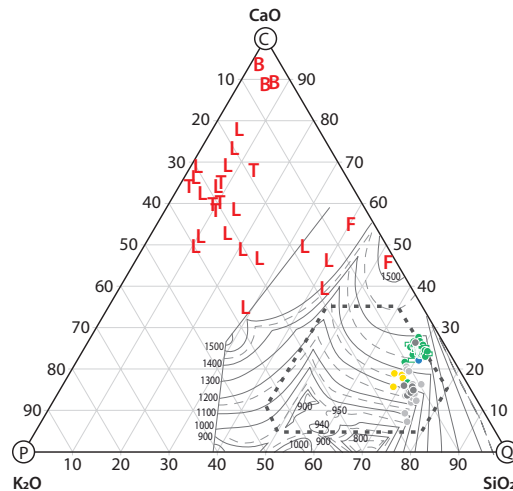
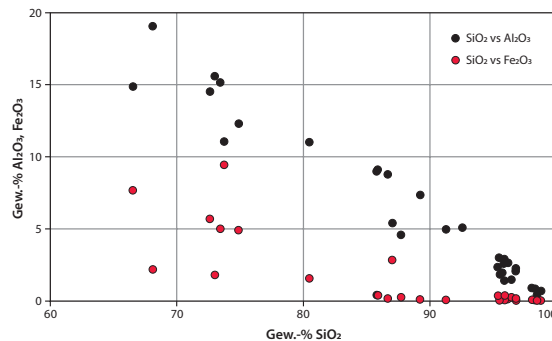


Abb. 121: Chemische Analysen von Huppererden aus dem Schweizer Jura. Literaturdaten und neue Analysen (Hup-01 bis Hup-18 in Annex 2). Eisengehalt (rot) und Aluminiumgehalt (schwarz) sind nicht korreliert. Huppererden mit  $\text{SiO}_2 > 97$  Gew.-% gehören zu den selteneren quarzreichen Sanden des Jura.



Weitere Komplikationen sind der natürlichen Heterogenität der Baumasche in Abhängigkeit des Standortes/Bodensubstrates zuzurechnen sowie der stofflichen Variabilität innerhalb des Baumes (Stammholz, Äste, Rinde; Abb. 120).<sup>346</sup>

In Anbetracht des geringen Aschenanteils (0,5 bis 1 %) des Frischholzes liegt eine solche «Ascherei» eigentlich nahe. Ferner dürfte es notwendig sein, nicht nur die historisch verbürgte Verwendung von Buchenholzasche im Auge zu behalten, sondern auch zu prüfen, ob mit anderen Holzaschen ebenfalls Glas hergestellt werden kann, und ob sich eine solche Asche allenfalls in der Glaszusammensetzung widerspiegelt.

Es stellen sich somit zahlreiche Fragen, die ohne ein breit angelegtes Forschungsprojekt nicht abschliessend beantwortet werden können. Ein solches Projekt ist aus Kostengründen nicht realisiert worden. Die allgemeinen, naturwissenschaftlich-analytischen Recherchen und Experimente mit Aschen, Sanden und experimentell hergestellten Gläsern beruhen zum Teil auf Arbeitsergebnissen

eines archäometrischen Sommerkurses der Universität Basel (2002) bzw. sind 2001 und 2004 auf der Basis von *intra muros funding* des Geochemischen Labors der Universität Basel durchgeführt worden.

#### 4.3.1.1 Rohmaterial Quarz

Im Gegensatz etwa zum Schwarzwald sind quarzreiche geologische Formationen im Jura ausgesprochen selten; im Norden fehlen sie ganz. Bekannt sind eozäne, sogenannte Huppererden, quarzreiche Verfüllungen in Taschen, namentlich von Malmkalken.<sup>347</sup> Diese in Karsthöhlungen anzutreffenden Verfüllungen sind volumenmässig meist recht klein dimensioniert. Die jeweils zu gewinnende Masse dürfte in der Grössenordnung von einigen Dutzend Tonnen Sand liegen. Eozäne, quarzreiche Sande waren zunächst für die Glasbereitung, und später als Formsande für die Eisengiesserei von Bedeutung und wurden bis in das 19./20. Jahrhundert abgebaut. Zu den *sables argileux maigres* (Hupper) und den *sables quartzueux blancs* (Quarzsand, *sable vitrifiable*) aus der Gegend um Court und Chaluet gibt Pfirter cursorisch Auskunft.<sup>348</sup>

Die Huppererden weisen zum Teil einen Aluminiumgehalt ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) von unter 3 Gew.-% und insgesamt eine hohe Reinheit auf, was durch die Nähe der Projektionspunkte zur Verbindungsgeraden ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 100$ ) belegt wird (vgl. Abb. 121; 122a).

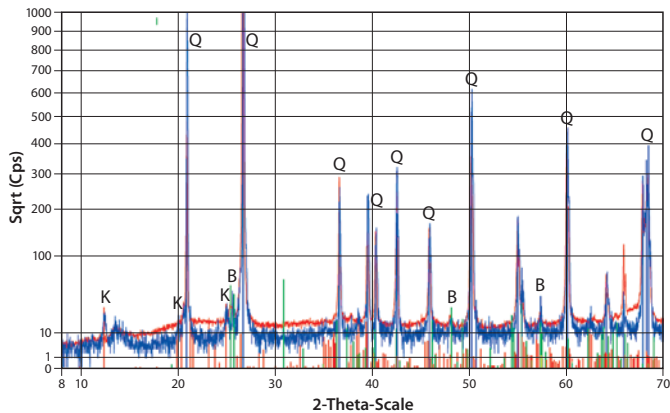
Eine Korrelation vom Farbton der Huppererde mit dem Quarzgehalt scheint nicht gegeben zu sein; Huppersande mit einem Siliciumgehalt ( $\text{SiO}_2$ ) über 98 Gew.-% können beige, grau, rosa oder weiss sein. Ihr geringer Anteil an färbenden Komponenten lässt sie als geeignetes Rohmaterial für die Glasbereitung erscheinen. Ob allerdings die analysierten Sande von Court für die dritte Glashütte Chaluet, Pâturage de l'Envers verwendet worden sind, lässt sich aufgrund der Analysen nicht beweisen, aber auch nicht ausschliessen.<sup>349</sup> Ihre Verwendung würde neben  $\text{SiO}_2$  einen Gehalt von ungefähr 1 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  am Glas beisteuern. Einzelne Huppererden zeichnen sich durch einen hohen Titangehalt ( $\text{TiO}_2$ ) aus, der auch im Glas anzutreffen wäre, wenn ein solcher Sand bei der Glasbereitung Verwendung gefunden hätte.

<sup>346</sup> Vgl. dazu auch Wolff 1871; Maus/Jenisch 1997/98, 363–368; Wedepohl 2003, 133–134; Čilová/Woitsch 2012, 376.

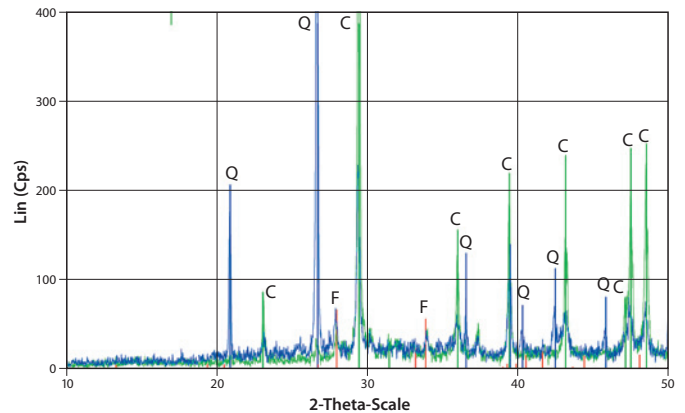
<sup>347</sup> Niggli/De Quervain/Winterhalter 1930, 281; z. B. Analysen-Nr. 78: 99 %  $\text{SiO}_2$ .

<sup>348</sup> Pfirter et al. 1996 et Pfirter 1997, 22.

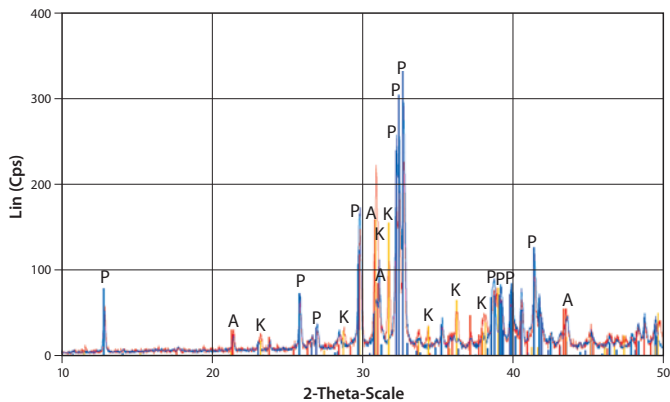
<sup>349</sup> Siehe zudem auch chap. 2.1.1.1 und 5.5 sowie Gerber 2010, 32–33.



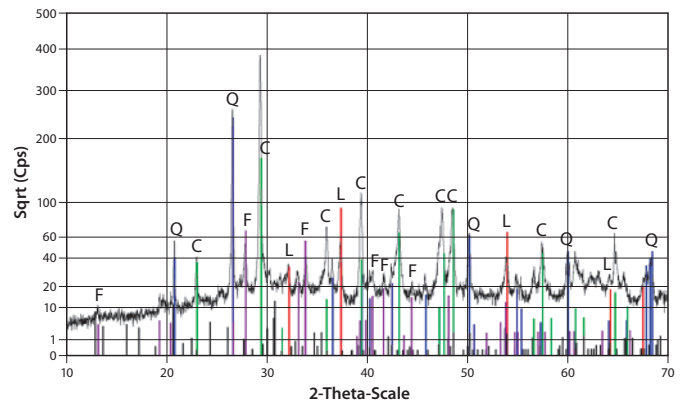
a: Quarzsand/Huppererden Nr. 04 (rot) und Nr. 11 (blau). Quarz = Q 33-1161 (blau), Kaolinit = K 80-0886 (rot), Brookit = B 76-1934 (grün). In Nr. 04 ist lediglich Quarz (Q) nachweisbar, in Nr. 11 dagegen auch Brookit (B) sowie Kaolinit (K).



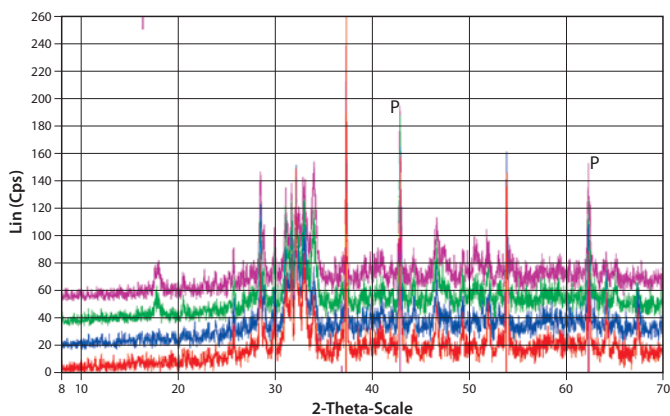
b: Buchenasche aus Chaluet (blau) und von Kleinfützel (grün). Quarz = Q 33-1161 (blau), Calcit = C 05-0586 (grün), Fairchildit = F 21-1287 (rot). Die Buchenasche aus Chaluet ist quarzreich, jene aus Kleinfützel calcitreich; in beiden ist etwas Fairchildit nachweisbar.



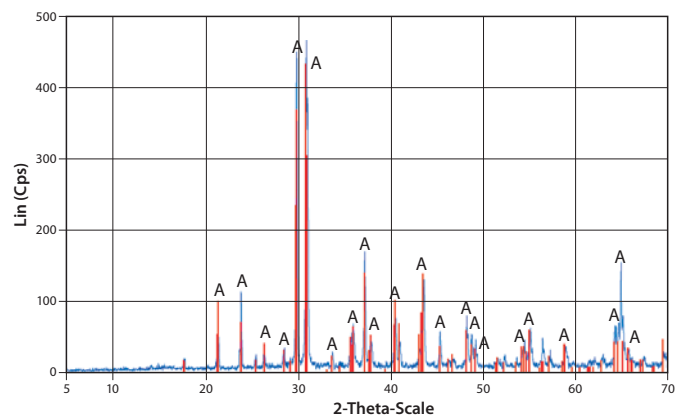
c: Eluat aus Buchenasche (10 g) von Chaluet, frisch (blau), 50 Stunden gelagert (rot). Kaliumcarbonathydrat = P 73-0470 (blau), Kaliumhydrogen-carbonathydrat = K 20-0886 (orange), Arcanit = A 05-0613 (rot). Das im frischen Eluat vorherrschende Pottaschenmineral ist weniger hydratisiert als das gelagerte, das zusätzlich Arcanit aufweist.



d: Nadelholzasche (Fichtenasche < 0.2 mm) aus Chaluet (schwarz). Quarz = Q 33-1161 (blau), Calcite = C 24-0027 (grün), Calciumoxid = L 77-2376 (rot), Fairchildit = F 21-1287 (violett). Die Asche enthält als mineralische Hauptkomponenten Quarz und Calcit, als Nebenkompenten Fairchildit und gebrannten, unhydratisierten Kalk. Der sonst gelegentlich auftretende Portlandit ist hier nicht nachweisbar.



e: Buchenasche Kleinfützel nach unterschiedlicher Lagerungszeit frisch nach Brand bei 1150 °C (rot), nach 7 Stunden an Luft (blau), nach 24 Stunden an Luft (grün), nach 72 Stunden (violett). Während Periklas (MgO) = P 45-0946 (rosa) in allen Proben nachweisbar ist, entwickelt sich bei 18 °C nach rund 20 Stunden eine neue, aber schlecht kristallisierte Phase.



f: Farblose Galle von Birkenaschenschmelze abgeschöpft (blau). Einzige sichtbare mineralische Komponente ist hier Arcanit = A 44-0414 (rot), kristallisierte Chloride oder weitere Sulfate sind nicht nachweisbar.

Abb. 122: Röntgendiffraktionsaufnahmen (XRD) von Rohmaterialien der Kaliglasherstellung (Pulver, Presslinge). Literaturdaten (Codes der JCPDS-Da-tei) sind als verschiedenfarbige vertikale Striche und mit Buchstaben für die einzelnen Codes dargestellt. Für Technische Einzelheiten vgl. Stern/Gerber 2004a, für die identifizierten Mineralisationen sei auf den Text verwiesen.

Die mineralogische Zusammensetzung einer Huppererde aus Souboz (Hup-04) und aus Court, Mont-Girod (Hup-11) zeigt neben Quarz auch das Tonmineral Kaolinit sowie möglicherweise etwas Brookit ( $\text{TiO}_2$ ). Einzelne Huppererden enthalten chemisch in der Tat bis zu 1 Gew.-%  $\text{TiO}_2$ .

#### 4.3.1.2 Rohmaterial Holzasche

Seit der Pionierarbeit von Wolff<sup>350</sup> ist bekannt, dass die Asche von Holz je nach Standort des Baumes, Teil (Stamm, Äste, Rinde) und Spezies in weiten Grenzen variieren kann, dass einzelne chemische Elementoxide wie etwa Calcium ( $\text{CaO}$ ) stark von der Bodenbeschaffenheit abhängen, andere hingegen als essenzielle Elemente selektiv aus dem Substrat angereichert werden, wie Phosphat ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), das im Substrat oft nur als Spurenelement auftritt, in der Holzasche aber immer eine Hauptkomponente darstellt. Es variieren aber nicht nur das  $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ -Verhältnis, sondern neben  $\text{P}_2\text{O}_5$  auch andere Hauptkomponenten, wie Aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Eisen ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Mangan ( $\text{MnO}$ ), Magnesium ( $\text{MgO}$ ), die dann nicht nur die Zusammensetzung des Glases und dessen Farbe mitbestimmen, sondern in gleicher Weise auch jene der sogenannten Fritte als Zwischenprodukte (Abb. 123; vgl. dazu auch Kap. 4.2.3.5).

Wie verschieden die Rohasche von Buchen auf unterschiedlichem Standort zusammengesetzt sein kann, zeigen die Diffraktogramme (Abb. 122b–c). Die analysierten Holzaschen lassen eine grosse stoffliche Variationsbreite erkennen, die weniger von der Pflanzenspezies abhängt als vom Standort: der Anteil von  $\text{CaO}$  der Buchenasche variiert von 45 bis 80 %,  $\text{SiO}_2$  von 5 bis 35 % (Abb. 122e).

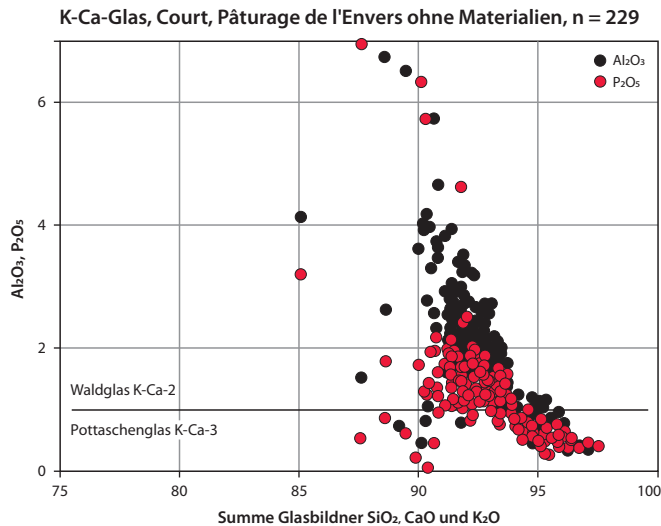
Die Rohasche von Buchenholz mit Standort auf Hanglehm (Chaluet) zeigt als mineralische Hauptkomponenten Quarz und wenig Kalzit, die Rohasche von Buchenholz auf kargem Kalkboden (Kleinlützel SO) dagegen zeigt Kalzit als Hauptkomponente begleitet von wenig Quarz. Beide Aschen enthalten etwas Fairchildit. Diffraktionsaufnahmen geben auch Auskunft über mineralogische Veränderungen einer Asche während des Lagerns (Abb. 122e).

Die grosse chemische Variationsbreite von Holzasche hat, wie oben angedeutet, ihre mineralogischen Entsprechungen und macht einzelne Aschen geeigneter für bestimmte Glastypen und Glasfarben als andere. Ob eine bestimmte Asche für die Glasbereitung geeignet war oder nicht, entschied mangels analytischer Fakten wohl eher die Erfahrung und *trial and error* als theoretisches Wissen.

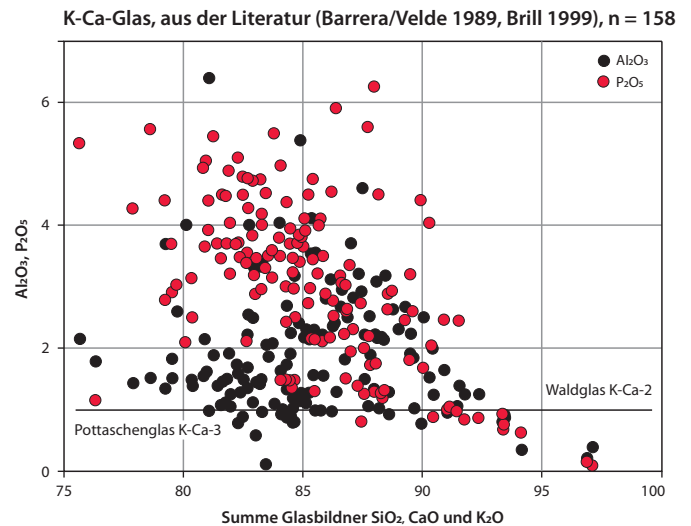
Neben den genannten mineralischen Hauptkomponenten, die als Netzwerkbildner (Quarz) und Stabilisator (Kalzit) wirken, enthält die Asche mehrere kaliumreiche Phasen, von denen einzelne Netzwerkandler sind und im Aschenextrakt (Pottasche) nachgewiesen werden können (Abb. 122b–c). Je nach Lagerungsumständen erscheinen unterschiedliche wasserhaltige Kaliumcarbonate:  $\text{K}_2\text{CO}_3(\text{H}_2\text{O})1.5$  (Code 73-0470) und  $\text{K}_4\text{H}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  (Code 20-0886; entwickelt sich im Verlauf von Stunden nach dem Extraktionsprozess: Abb. 122c) sowie die mehrfach erwähnte Galle (Arcanit,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , Code 05-613; Abb. 122c, f).

Fritte als Halbfabrikat der Glasherstellung muss zwingend dieselbe Elementkonfiguration aufweisen wie die Glasschmelze, wenn beim Fritten lediglich flüchtige Bestandteile entzogen werden, andernfalls liegt ein technologisch verschiedenartiges Produkt vor. Das K-Ca-Glas von Court, Pâturage de l'Envers (Abb. 123a–b) zeigt eine wesentlich geringere Variationsbreite als das K-Ca-Glas aus der Literatur (Abb. 123c–d); die Summe der Glasbildner ist beim Pottaschenglas (K-Ca-3 [mit  $\text{P}_2\text{O}_5 < 1$  Gew.-%]) mit 94 bis 97 Gew.-% am grössten, bei Fritten mit 87 und 93 Gew.-% am tiefsten. K-Ca-3- bzw. Pottaschenglas weist – bedingt durch den Herstellungsprozess der Pottasche – auch den geringsten Aluminiumgehalt ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) auf. Bemerkenswert ist die Seltenheit des Pottaschenglases unter den Literaturdaten sowie ihre Häufung beim Glas aus Deutschland und Österreich. Bei den aluminiumreichen und als «Fritten» bezeichneten Proben von Court, Pâturage de l'Envers (Abb. 123c: Fritte = f, n = 30) geht es möglicherweise um eine Abscheidung/Segregation aus der Schmelze, um eine Schlacke des Produktionsprozesses also, aber nicht um eine Fritte im eigentlichen Wortsinn. Vielleicht handelt es sich um *Sandever* der historischen

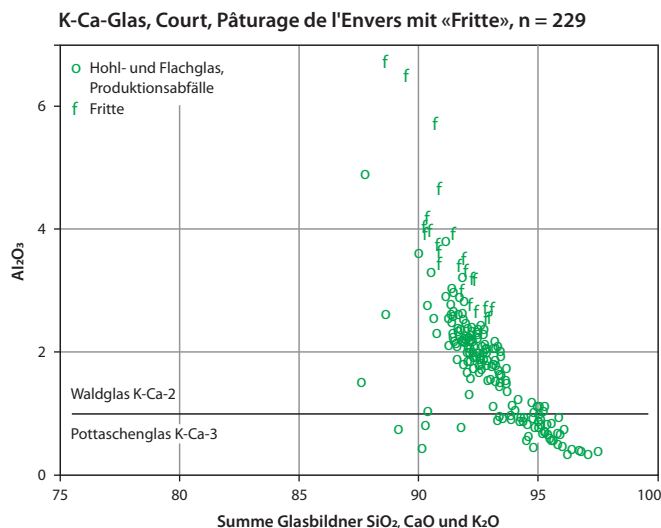




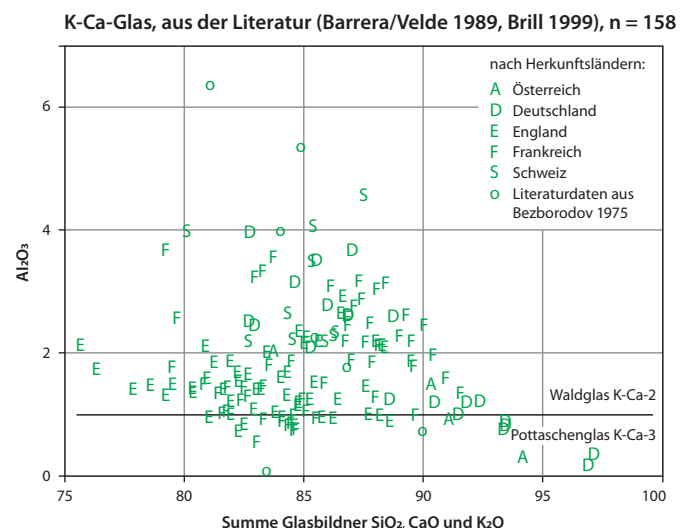
a: Phosphatarne Pottaschengläser weisen gleichzeitig auch wenig  $\text{Al}_2\text{O}_3$  auf, weil es beim Extraktionsprozess zur Pottaschengewinnung im Rückstand zurückbleibt. Waldglas enthält je nach Standort des Asche liefernden Baumes unterschiedliche Aluminatanteile; ein geringer Anteil stammt aus der Huppererde.



b: Die Projektionspunkte der entsprechenden Literaturdaten schwanken in grossen Bereichen.



c: Die als «Fritte» bezeichneten und analysierten Gläser zeichnen sich durch einen hohen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt aus.



d: Nach Herkunftsländern aufgeschlüsselte Literaturdaten. Gläser aus England scheinen eine geringere Summe an eigentlichen Glasbildnern aufzuweisen, was auf die Anwesenheit von zusätzlichen chemischen Hauptkomponenten wie  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$  und  $\text{MgO}$  hinweist.

Abb. 123: Die Summe der glasbildenden Komponenten  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  und  $\text{K}_2\text{O}$  (x-Achse) gegenüber  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{P}_2\text{O}_5$  (schwarze resp. rote Punkte, y-Achse) der analysierten Gläser (in Abb. 123a, c: n = 229) und aus der Literatur (in Abb. 123b, d: nach Brill 1999 sowie Barbera/Velde 1989: n = 158, aufgeschlüsselt nach Herkunft). Das 1 Gew.-%  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Kriterium für Waldglas (K-Ca-2, oben) gegenüber Pottaschenglas (K-Ca-3, unten) ist als horizontale Linie eingeblendet. Auffällig ist zunächst die wesentlich geringere Streubreite des Glasbildners im analysierten Glasmaterial gegenüber den Literaturwerten und der höhere Anteil an Pottaschenglas.

Quellen (Frank 1982), das von Glasgalle (Arcanit,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) verschieden ist.

Bezüglich der in Court und dessen Nähe verfügbaren Rohmaterialien darf zusammenfassend festgehalten werden, dass auch heute noch geeignete Quarzsande vorhanden sind und dass je nach Standort der Bäume

– Buchen oder Nadelhölzer – auch geeignete Aschen greifbar waren und erst recht Aschenextrakte (Eluat, Pottasche). Ob die Bäume zum Ort der Glashütte gebracht worden sind oder ob Asche dezentral «im Wald» produziert und die Asche zur Glashütte gebracht worden ist, lässt sich aufgrund der hier

vorgelegten Ergebnisse nicht klären. Der gegenüber manchen Waldgläsern erhöhte Titan-gehalt mancher Gläser von Court, Pâturage de l'Envers kann von der verwendeten Huppererde rühren, aber auch aus der Baumasche selber stammen.

#### 4.3.2 Holzverbrauch und Glasproduktion

Die Herstellung von Waldglas benötigt nicht nur Holz zum Betrieb der Schmelzöfen, sondern insbesondere für die Bereitstellung der Holzasche als Schmelzmittel/Stabilisator oder als Ausgangsmaterial für die Pottaschenextraktion. Dies führt zur Frage, wie viel Holz eine mittlere Glashütte jährlich konsumiert und welcher Fläche Wald dieser Bedarf entspricht. Ist die Betriebsdauer einer Glashütte möglicherweise durch die sich von Jahr zu Jahr verlängernden Transportwege des Holzes zur Hütte bestimmt? Literaturangaben zum Waldverbrauch<sup>351</sup> variieren mit einer Bandbreite von 0.45 bis 5.5 ha Wald für eine Tonne Waldglas in erklärungsbedürftigem Masse. Schätzungen zum Holzverbrauch einer Glashütte gingen bisher oft von der mutmasslichen Menge des Fertigproduktes Glas aus und vernachlässigten – wohl unter Annahme einer vollständigen Wiederverwendung des Glasbruchs – den Ausschuss der Glasproduktion.

Letzterer dürfte wie der Grabungsbefund für die Hütte Court, Pâturage de l'Envers zeigt, aber recht bedeutend gewesen sein.

Unsicherheiten der Quantifizierung bestehen auf allen Ebenen:

1. Wie viel Kilogramm Frischasche oder gelagerte Holzasche braucht es für die Herstellung von einer Tonne Waldglas bei gängiger Rezeptur von Asche zu Sand?
2. Was ist der Aschengehalt von Frischholz oder Trockenholz von Buche oder Fichte?
3. Wie viel Kilogramm Scheitholz enthält ein «Festmeter» bzw. 1 Kubikmeter?
4. Wie viele Kubikmeter Holz können pro Flächeneinheit jährlich nachhaltig oder durch Kahlschlag geerntet werden?
5. Wie stark hängt der Holzertrag von Spezies und von lokalen Gegebenheiten des Bodens, des Klimas und der Höhe über Meer ab?

Keine der Fragen ist mit fixen Zahlen zu beantworten; von einigen sind überhaupt keine Angaben in den zugänglichen Unterlagen zu finden. Eine Modellrechnung möge die Situation abzuschätzen versuchen.

1. Frisch hergestellte Asche hydratisiert und recarbonatisiert innert Stunden und Tagen, wie Experimente gezeigt haben. Bei Verwendung von gelagerter Asche dürfte ein Asche-Sand-Verhältnis von 2 zu 1 zu veranschlagen sein, im Fall von frisch gebrannter Asche ein solches von 1 zu 1. Bei Verwendung von gelagerter Asche dürften rund 1 t Asche und 500 kg Quarzsand benötigt werden; beim Fritten und Schmelzen werden grössenordnungsmässig 500 kg Carbonat ( $\text{CO}_2$ ), Wasser und gegebenenfalls weitere flüchtige Verbindungen freigesetzt. Für 1 t Waldglas braucht es somit 500 kg (frische) Asche, bis 1000 kg (gelagerte) Asche und 500 kg Quarzsand/Huppererde.
2. Der Aschengehalt variiert gemäss Literaturangaben<sup>352</sup> von circa 0.3 bis 1.5 % je nach Trockenheit des verwendeten Holzes und Baumspezies. Bei Verwendung von frischem Buchenholz scheint ein Aschengehalt von 0.5 %, und damit für 1 t Asche eine Masse von 200 t Holz als plausible Grösse. Bei gut getrocknetem Holz dürften 100 t genügen.
3. Ein Festmeter/Kubikmeter ( $1 \text{ m}^3$ ) frisch geschlagenes Holz dürfte um 0.9 wiegen, 200 t Holz entsprechen somit  $222 \text{ m}^3$  (angetrocknetes Holz dürfte rund 400 kg [Nadelgehölz] bzw. 500 kg Laubgehölz [Buche] auf die Waage bringen).
4. Der Holzbestand pro Flächeneinheit (Hektar) variiert von  $105 \text{ m}^3$  in Schweden,  $116 \text{ m}^3$  in Frankreich bis  $360 \text{ m}^3$  in der Schweiz<sup>353</sup> und dürfte seinerseits als Mittelwert mit grosser Standardabweichung zu verstehen sein. Für den Jura werden  $350 \text{ m}^3$  pro ha für Holz ab 7 cm Stamm-durchmesser genannt.<sup>354</sup>  $222 \text{ m}^3$  entsprechen in Schweden einer Fläche von 2.1 ha Wald, in Frankreich von 1.9 ha, in der Schweiz von 0.63 ha.
5. Frage 5. ist nicht bezifferbar, vergrößert aber die Unsicherheit der Abschätzung. Wird das Fass nicht als Masseinheit für ein Volumen genommen, sondern als Gewichts-

351 Maus/Jenisch 1997/98; Wedepohl 2003.

352 Wolff 1871

353 Jahrbuch Wald und Holz 2002; Jahrbuch Wald und Holz 2004; Jahrbuch Wald und Holz 2006.

354 Mitteilung von Christophe Gerber, ADB; siehe auch chap. 2.1.2.5 und Fussnote 73.

einheit von 10 Ztr.<sup>355</sup>, so entspricht einem Fassinhalt ein Gewicht von 528 kg. Der Jahreskonsum der Glashütte betrug demnach  $19 \times 528$  kg Huppersand, das heisst rund 10 t.

Wird Glas mit gelagerter Asche hergestellt, so braucht es nach oben genannten Ansätzen für 1 t Waldglas 500 kg Sand plus 1000 kg Asche. Die Jahresproduktion der Glashütte beläuft sich gemäss dieser Schätzung auf 20 t Glas, von dem rund 50 % – gemäss Schätzungen<sup>356</sup> – zunächst als Ausschuss (Kolben, Pfeifenabschläge, Produktionsabfälle) anfällt. Ob der gesamte Abfall recycelt wurde oder nur ein wesentlicher Teil, muss eine offene Frage bleiben.

Den nominal 20 t Waldglas stehen einerseits 10 t Sand, andererseits 20 t gelagerte Asche bzw. 10 t Frischasche als Ausgangsmaterialien gegenüber. Für 10 t Frischasche müssen, gemäss Punkt 2.,  $10 \times 200 = 2000$  t Holz verascht werden oder etwas über 2220 m<sup>3</sup>. Wenn davon auszugehen ist, dass im Jura pro Hektar 350 m<sup>3</sup> Holz mit Stammdurchmesser grösser als 7 cm anfallen und das restliche Holz nominal für den Betrieb der Ofenfeuerung aufgerechnet werden kann, so resultiert ein jährlicher Waldverbrauch von 6.3 ha oder in den 15 Jahren Betriebsdauer des Ofens von 95 ha (0.95 km<sup>2</sup>). Bei einer als kreisförmig angenommenen Rodungszone betrüge der Transportweg zu Ende der Produktionszeit somit knapp 550 m, bei nachhaltiger Nutzung des Waldes anstelle von Kahlschlag entsprechend sehr viel mehr.

### 4.3.3 Rezepturen zur experimentellen Herstellung

Es ist schon früher festgehalten worden (Kap. 4.1.3; 4.3.1.2), dass die chemischen Hauptkomponenten der Holzasche von Standort zu Standort (z. B. Jura, Schwarzwald) eines Baumes stärker variieren als von Spezies zu Spezies (Abb. 124). Daraus leitet sich die Vermutung ab, es sei für die Waldglasproduktion nicht nur Buchenasche oder Laubholz im Allgemeinen geeignet, sondern möglicherweise auch Nadelholz. Der stark wechselnde und zum Teil hohe Siliciumgehalt (SiO<sub>2</sub>) dürfte hingegen eher auf die Bodenbeschaffenheit des Standortes zurückzuführen sein als auf die Spezies.

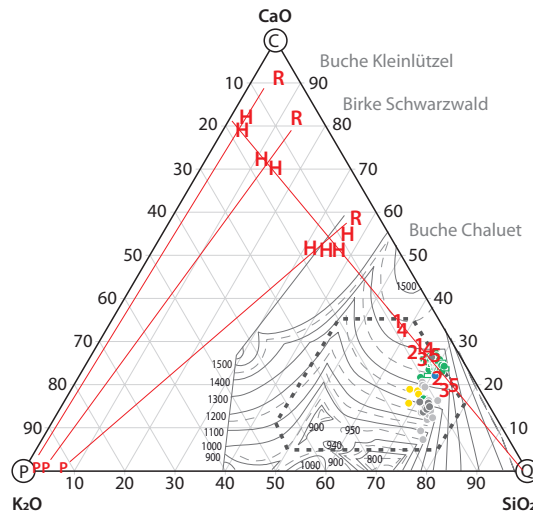


Abb. 124: Neue Aschenanalysen von Bäumen unterschiedlicher Herkunft. Holzaschen (H) aus dem Jura und dem Schwarzwald (Buche, Birke), die aus ihnen extrahierten Pottaschen (P) sowie die Extraktionsrückstände (R) liegen erwartungsgemäss auf Verbindungsgeraden. 1 = Laborgläser aus Buche Kleinlützel, 2 = Buche Court, 3 = Buche Schwarzwald, 4 = Birke Schwarzwald, 5 = Nadelholz Schwarzwald. Mischungsverhältnisse jeweils 1:2 und 3:2 (vgl. Stern/Gerber 2004b).

Dieser Frage wurde unter anderem im Rahmen eines archäometrischen Sommerkurses der Universität Basel experimentell nachgegangen.<sup>357</sup> Es wurden Hölzer von unterschiedlichen Standorten und Spezies gesammelt, verascht, analysiert, in unterschiedlichen Mischverhältnissen mit Quarzsand gemischt und im Labor zu Glas verarbeitet (Abb. 120; 123–127). Ein besonderes Augenmerk galt dabei dem Schmelzverhalten von integraler Holzasche plus Sand, und von Holzaschenextrakt plus Sand. Auch der Rückstand der Extraktionsgewinnung wurde als Stabilisator experimentell berücksichtigt (vgl. Abb. 125). Die stark färbende Wirkung des Rückstands lässt aber vermuten, dass in der Hütte von Court, Pâturage de l'Envers wohl eher ein in der Nähe verfügbarer, reiner Jurakalk verwendet wurde als der Rückstand der Pottaschengewinnung.

Zunächst aber war zu klären, ob die in der Literatur angesprochenen Proportionen von Asche zu Sand Volumenverhältnisse oder Massenverhältnisse bedeuten. Die mittelalterlichen Quellen sprechen von «Teilen» Asche und Sand. Wegen des stark verschiedenen und variablen Schüttgewichtes der Asche war anzunehmen, dass es um Massenverhältnisse geht, obwohl mit einem Hohlmass vermutlich einfacher umzugehen war als mit einer Waage.<sup>358</sup> Ein Liter Huppererde (Nummer 11; vgl. Abb. 129) wiegt 1.35 kg, ein Liter gelagerte Buchenasche (Herkunft Kleinlützel SO, Jura) 0.35 kg, nach Calcination bei 1000 °C noch 0.157 kg. Gleiche Volumina von Asche und Sand führen zu einem extrem

355 Freundlicher Hinweis von Christophe Gerber, ADB, im E-Mail vom 7. 10. 2011.

356 Mitteilung von Christophe Gerber, ADB; siehe auch chap. 2.1.2.2–2.1.2.5; 2.1.6.

357 Vgl. Stern/Gerber 2004b, 148–153.

358 Stern/Gerber 2004b, 151.

Abb. 125: Rohmaterialien und experimentell hergestellte Gläser (Sommerkurs Archäometrie Juni 2002, Universität Basel).

a: Die Rohmaterialien Quarzsand, Holzasche und Aschenextrakt sind zunächst meist verunreinigt und nicht farblos. Die Asche ist je nach Holzkohlenmenge hell- bis dunkelgrau. Sieben entfernt grosse Kohlepartikel, jedoch nicht die feinen, so dass die Asche hellgrau bleibt. Holzkohle kann aber auch ohne grossen Kohleanteil dunkel gefärbt sein, wie die Birkenasche. Ihre chemische Analyse zeigt erhebliche Verunreinigungen.

Buchenasche ungesiebt mit Holzkohle



Quarzsand unbehandelt



Buchenaschenextrakt «Pottasche/Eluat»

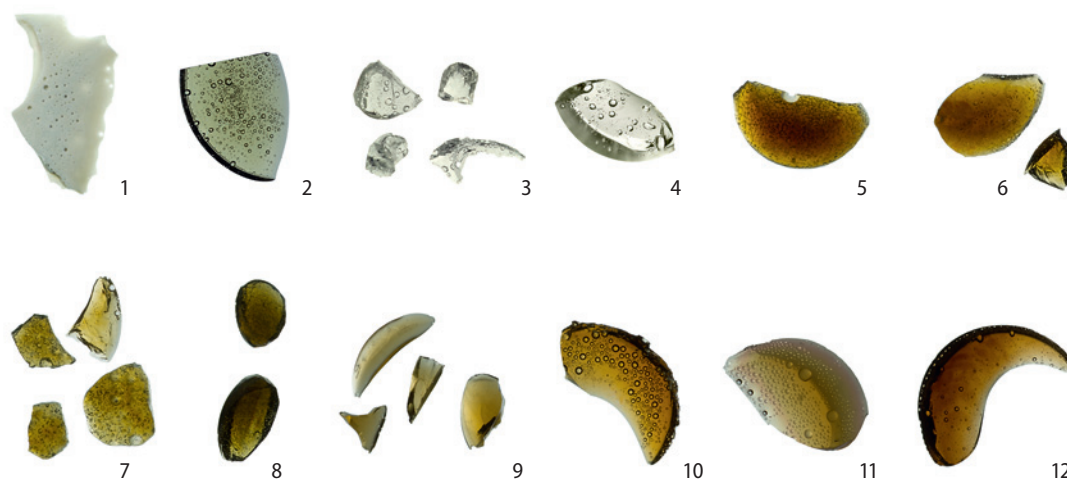


Birkenasche gesiebt



b: Zweikomponentengläser vom Typ K-Ca-2/Waldglas zeigen je nach Rezeptur, Herkunft der Rohmaterialien und Glasdicke recht unterschiedliche Farbnuancen, die von oliv/braun (Buche Schwarzwald, Birke Schwarzwald, Nadelholz Schwarzwald, Court) bis farblos (Buche Court, Kleinlützel) reichen. M 2:3.

Waldglas



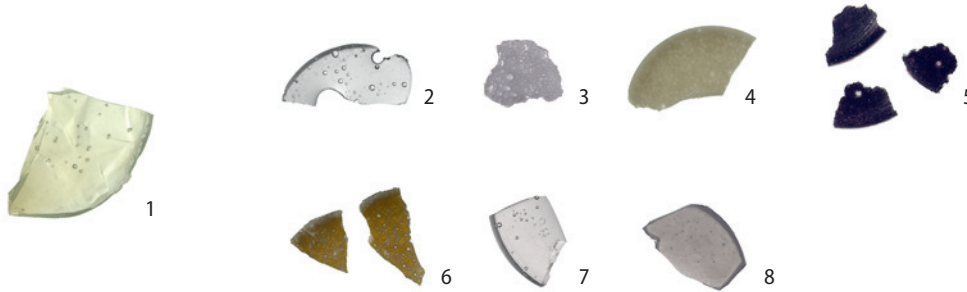
#### K-Ca-2-Gläser, Typ «Waldglas»

1 Buche Court, Pâturage de l'Envers 3 g Asche ≠4 3 g Quarz/Hup 11 1350 °C XV-10078 [2002]	2 Buche Court, Pâturage de l'Envers 3 g Asche ≠3 2 g Quarz/Hup 11 1300 °C XV-10079 [2002]	3 Buche Kleinlützel 3 g Asche ≠2 3 g Quarz/Hup 11 1350 °C XV-10072 [2002]	4 Buche Kleinlützel 3 g Asche ≠1 2 g Quarz/Hup 11 1350 °C XV-10071 [2002]	5 Buche Schwarzwald 3 g Asche ≠14 3 g Quarz/Hup 11 1350 °C XV-10068 [2002]	6 Buche Schwarzwald 3 g Asche ≠6 2 g Quarz/Hup 11 1300 °C XV-10077 [2002]
7 Nadelholz, Pâturage de l'Envers 3 g Asche ≠10 3 g Quarz/Hup 11 1350 °C XV-10070 [2002]	8 Nadelholz, Pâturage de l'Envers 3 g Asche ≠9 2 g Quarz/Hup 11 1300 °C XV-10067 [2002]	9 Nadelholz, Schwarzwald 3 g Asche ≠8 3 g Quarz/Hup 11 1300 °C XV-10065 [2002]	10 Nadelholz, Schwarzwald 3 g Asche ≠7 2 g Quarz/Hup 11 1300 °C XV-10075 [2002]	11 Birke, Freiburg i.B. 3 g Asche ≠12 3 g Quarz/Hup 11 1350 °C XV-10074 [2002]	12 Birke, Freiburg i.B. 3 g Asche ≠11 2 g Quarz/Hup 11 1350 °C XV-10076 [2002]



Strohglas

Pottaschenglas

**K-Ca-1-Glas, Typ «Strohglas» K-Ca-3-Gläser, Typ «Pottaschenglas»**

1 Getreideasche Biotherm 1 Komponente – – 1300 °C XV-10631 [2005]	2 Buche Kleinflützel 0.1 g Asche, unbehandelt ≠5 0.6 g Quarz/B-100 0.3 g Eluat K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 1.5H <sub>2</sub> O – XV-9911 [2002]	3 Buche Kleinflützel 0.87 g Asche, unbehandelt 1.05 g Quarz/Hup 11 1.00 g Eluat – XV-10083 [2003]	4 Buche Jura (CH) 2.0 g Asche Court, Pâturage de l'Envers, unbehandelt 2.0 g Quarz/Hup 11 0.9 g Eluat Kleinflützel 1150 °C XV-9938 [2002]
5 Birke Freiburg i.B. (D) 0.892 g Aschenrückstand 0.320 g Quarz/Hup 11 0.397 g Eluat – XV-9928 [2002]	6 Buche Kleinflützel 0.81 g Aschenrückstand 1.67 g Quarz/Hup 11 1.89 g Eluat ≠11 1100 °C XV-9923 [2002]	7 Buche Kleinflützel 1.0 g Aschenrückstand 1.0 g Quarz/Hup 11 1.0 g Eluat ≠9 1260 °C XV-10080 [2003]	8 Buche Kleinflützel 1.0 g Asche, unbehandelt 1.0 g Quarz/Hup 11 1.0 g Eluat ≠10 1260 °C XV-9940 [2002]

c: Einkomponentenglas, hergestellt aus Getreideasche ohne Quarzsand und ohne Stabilisator vom Typ K-Ca-1/ Strohglas (1). Dreikomponentengläser vom Typ K-Ca-3/ Pottaschenglas (2 bis 8) sind potentiell nahezu farblos, wenn die Rohmaterialien entsprechend geläutert und frei von färbenden Elementoxiden sind. Die Zugabe von Extraktionsrückständen oder Rohaschen als Stabilisator zu Quarzsand und Eluat/ Pottaschenextrakt führt zu dunklen Tönungen. M 2:3.

hohen Silicium- (SiO<sub>2</sub>) und tiefen Calcium- (CaO) und Kaliumanteil (K<sub>2</sub>O), während sich mit gleichen Massen eine realistische Zusammensetzung ergibt, die dem analysierten Glas von Court, Pâturage de l'Envers entspricht (Abb. 128). Das technologisch wichtige (vgl. unten) CaO/K<sub>2</sub>O-Verhältnis bleibt in beiden Fällen selbstverständlich gleich.

Wegen des bedeutenden Zeitaufwands konnten im Laborversuch nicht alle wichtigen Variablen wie Standort des Baumes, Spezies, Sandtyp, Veraschungs- und Extraktionsmodus und Mischungsverhältnisse<sup>359</sup> systematisch und umfassend durchgespielt werden, zumal alle Edukte und Produkte (experimentell hergestellte Gläser) analytisch zu erfassen waren.

Gleichermassen wäre auch für die Herstellung des Pottaschenextrakts aus Holzasche grössere Aschenmengen erforderlich gewesen, somit konnten auch nicht von allen Hölzern K-Ca-3-Gläser hergestellt werden. Zwar liegen einige der mit Pottaschenextrakt produzierten Gläser in der Nähe eutektischer Minimaltemperaturen (vgl. Abb. 71), doch waren alle Schmelztemperaturen im Laborversuch

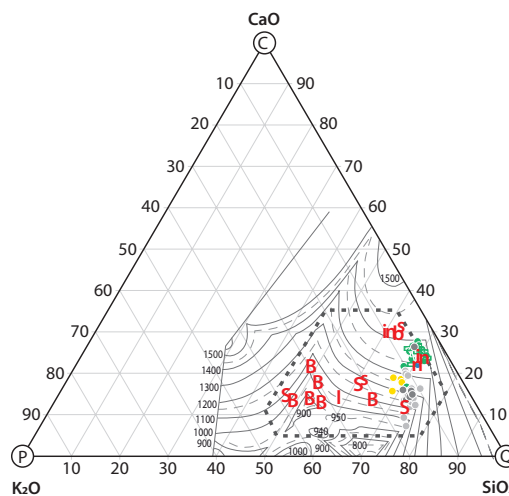
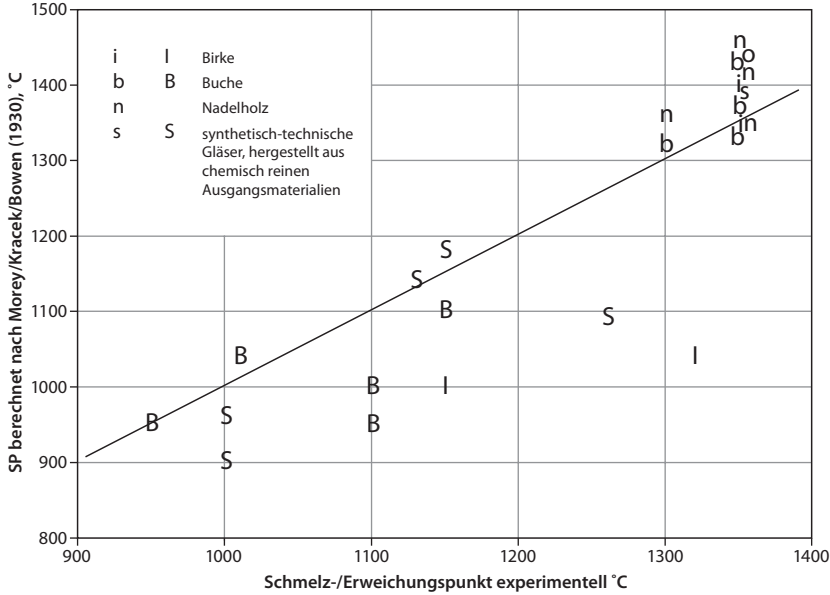


Abb. 126: Experimentell hergestellte K-Ca-2- (grüne Punkte) und K-Ca-3-Gläser (graue und gelbe Punkte): l, i = Birke; B, b = Buche; n = Nadelholz; S, s = technisch-synthetische Rohmaterialien.

über 1000 °C. Dies dürfte durch die Anwesenheit von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aus der Huppererde mitverursacht sein. Mehrere experimentelle Pottaschengläser wurden mit Aschenrückstand des Extraktionsprozesses als Stabilisatoren hergestellt, wodurch eine Reihe weiterer Oxide der Elemente Magnesium (Mg), Aluminium (Al), Phosphor (P), Mangan (Mn) und Eisen (Fe) in die Schmelze gelangt sind (Abb. 126).

359 Für verschiedene Mischungsverhältnisse, s. u. a. Bezborodov 1975, 73–75; Stern/Gerber 2009, 109.

Abb. 127: Experimentell hergestellte Holzaschen- und Pottaschengläser und ihr gefundener (x-Achse) und nach dem Diagramm von Morey/Kracek/Bowen (1930) berechneter Schmelzpunkt (y-Achse) in °C. Kleinbuchstaben stehen für K-Ca-2-Glas, Grossbuchstaben für K-Ca-3-Glas, die durchgezogene Linie gibt die Korrelationsgerade wieder.



Gew.-%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Gleiche Volumina	86.6	2.4	0.15	0.02	0.6	7.6	0	1.6	0.3
Gleiche Massen	64.4	2.1	0.21	0.06	2.0	24.0	0.1	5.5	0.9

Abb. 128: Berechnete Glaszusammensetzung bei Annahme von gleichen Volumina Asche zu Sand gegenüber gleichen Massenanteilen.

So existieren im vorliegenden Datenmaterial aus der Umgebung der Glashütte nur insgesamt zwei Baumaschen, je eine von Buche und Fichte (Code A, B in Abb. 129), aber nur das Aschenextrakt der Buche (C), weil von der Fichte nicht genug Asche vorlag, um ein Pottaschenextrakt herzustellen. Damit sind Aussagen zu Mittelwerten und Variationsbreiten nicht möglich.

Die ternäre Darstellung der glasbildenden Hauptkomponenten SiO<sub>2</sub>, CaO und K<sub>2</sub>O (Abb. 71) zeigt, dass eutektische Minimaltemperaturen unter 1000 °C durch einfache Mischung von Quarzsand mit nativer Gesamtholzasche, mit Pottaschenextrakt oder gar mit dem Rückstand nach Pottaschenextraktion nicht zu gewinnen sind. Die Laborversuche belegen aber bedeutsame Unterschiede der Schmelztemperatur für K-Ca-2 (Waldglas) und K-Ca-3 (Pottaschenglas) (Abb. 127): Bei vollständiger Übereinstimmung von berechneter und experimentell gefundener Schmelztemperatur müssten alle Punkte auf der Korrelationsgeraden liegen. Die Abweichungen dürften auf die gegenüber den Testproben von

Analysierte Produkte der Glashütte Court, Pâturage de l'Envers

Code	Mittelwert n = 101 W Waldgl/ K-Ca-2	Mittelwert n = 43 P Pott.glas/ K-Ca-3	Mittelwert n = 29 F Fritte/Schlacke
SiO <sub>2</sub>	63.70	68.90	67.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.06	1.91	4.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.73	0.23	0.80
MnO	0.27	0.57	0.20
MgO	2.01	1.92	1.90
CaO	22.77	14.42	18.70
Na <sub>2</sub> O	0.34	0.25	0.20
K <sub>2</sub> O	5.62	11.55	5.00
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.25	0.40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.78	0.62	1.10
Summe	99.55	100.62	99.80
CaO/K <sub>2</sub> O	4.05	1.25	3.74
Code	W	P	F
SiO <sub>2</sub>	69.2	72.6	74.0
CaO	24.7	15.2	20.5
K <sub>2</sub> O	6.1	12.2	5.5
SM	1360 °C	1200 °C	1400 °C

Alle Konzentrationsangaben in Gew.-%. SM = Schmelztemperatur geschätzt nach Morey/Kracek/Bowen (1930). Quelle: vgl. Stern/Gerber 2004b.

## Edukte

Herkunft Code	Asche Buche* Chaluet A	Asche Fichte* Chaluet B	Pottasche Buche* Chaluet C	Asche Buche* Klein- Lützel D	Pottasche Buche* Klein- Lützel E	Asche Birke* Schwarz- wald F	Pottasche Birke* Schwarz- wald G	Malkalk calcinert Typ Chaluet H	Hupper-11 Court Lac Vert I
SiO <sub>2</sub>	29.50	30.70	3.30	4.79	0.91	12.80	7.93	0.50	95.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.57	7.98	0.98	1.02	0.00	1.10	0.53	0.50	2.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.73	4.63	0.33	0.39	0.65	2.14	0.17	0.00	0.11
MnO	0.20	0.26	0.00	0.18	0.00	4.80	0.00	0.00	0.01
MgO	8.84	6.01	0.00	5.78	0.00	10.29	0.17	1.00	0.08
CaO	33.60	36.40	0.33	69.30	0.21	51.30	0.29	98.00	0.03
Na <sub>2</sub> O	0.50	0.57	0.99	0.22	1.20	1.54	3.49	0.00	0.15
K <sub>2</sub> O	10.53	9.51	93.20	14.56	95.76	8.32	87.20	0.00	0.17
TiO <sub>2</sub>	0.47	0.46	0.00	0.06	0.00	0.18	0.00	0.00	0.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.68	3.03	0.33	3.30	0.40	6.51	0.00	0.00	0.03
Summe	99.62	99.55	99.46	99.60	99.13	98.98	99.78	100.00	99.16
CaO/K <sub>2</sub> O	3.19	3.83	0.00	4.76	0.00	6.17			0.18

## Produkte, berechnete Glaszusammensetzung nach verschiedenen Rezepturen

	K-Ca-2 Waldglas							K-Ca-3 Pottaschenglas			
	Buche Sand	Buche Sand	Fichte Sand	Fichte Sand	Bu+Fi Sand	Buche Sand	Birke Sand	Buche Kalk+S	Buche Kalk+S	Buche Kalk+S	Birke Kalk+S
Herkunft	Chaluet	Chaluet	Chaluet	Chaluet	Chaluet	KI-Lützel	Schwwald	Chaluet	KI-Lützl	Chaluet	Schwww
Code	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	62.7	52.7	63.3	56.7	63.0	63.9	58.5	69.9	69.2	69.0	69.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.1	5.8	5.3	5.8	5.2	2.0	1.9	2.1	1.9	2.0	2.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.9	2.5	2.4	2.8	2.2	0.2	1.0	0.1	0.2	0.1	0.1
MnO	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	2.2	0.5	0.5	0.5	0.5
MgO	4.5	5.8	3.0	3.6	3.6	2.1	4.7	0.2	0.2	0.2	0.2
CaO	16.8	21.9	18.2	21.9	17.7	24.3	23.1	14.3	14.7	14.8	14.8
Na <sub>2</sub> O	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	0.8	0.2	0.3	0.2	0.6
K <sub>2</sub> O	5.4	6.9	4.8	5.8	5.0	5.2	3.8	11.3	12.1	10.8	11.9
TiO <sub>2</sub>	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.4	3.1	1.5	1.8	1.9	1.2	2.9	0.1	0.1	0.1	0.0
Summe	99.4	99.4	99.4	99.4	99.3	99.31	99.1	99.6	99.3	99.3	99.5
CaO/K <sub>2</sub> O	3.14	3.16	3.76	3.78	3.50	4.66	6.02	1.26	1.22	1.36	1.24

## Rezepturen

50 A	65 A	00 A	00 A	20 A	35 D	45 F	12 C	12.5 E	11.5 C	13.5 G
50 I	35 I	50 B	60 B	30 B	65 I	55 I	14.5 H	15 H	15 H	15 H
		50 I	40 I	50 I			72.5 I	72 I	71.5 I	70.5 I
							0.5 MnO	0.5 MnO	0.5 MnO	0.5 MnO

## Glasbildende Hauptkomponenten in Prozent

Code	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	73.9	64.7	73.3	67.2	73.5	68.4	68.5	72.7	71.7	72.6	71.9
CaO	19.8	26.9	21.1	25.9	20.7	26.0	27.0	15.5	15.2	15.6	15.4
K <sub>2</sub> O	6.4	8.5	5.6	6.9	5.8	5.6	4.4	11.8	13.1	11.9	12.8
SM	1360 °C	1370 °C	1340 °C	1360 °C	1400 °C	1370 °C	1370 °C	1200 °C	1200 °C	1200 °C	1200 °C

Alle Konzentrationsangaben in Gew.-%. \* Kaliumsulfat und -chlorid rechnerisch entfernt. Chaluet = Court, Pâturage de l'Envers. Quelle: vgl. Stern/Gerber 2004b.

Abb. 129: Analysen von Baumaschen und Rezepturen von Gläsern im Vergleich zum analysierten Glas von Court, Pâturage de l'Envers.

Morey/Kracek/Bowen (1930) komplexere Zusammensetzung der Aschen zurückzuführen sein (Aluminium-, Eisen-, Phosphoroxide). Abweichung von der theoretischen Schmelztemperatur können auch von der Korngrösse der verwendeten Ausgangsmaterialien sowie von der Dauer des Schmelzexperimentes abhängen. Sie betrug zur Schonung der Laboröfen in der Regel lediglich eine Stunde, was nicht immer für die Erzeugung einer blasenfreien Schmelze reichte (vgl. auch Abb. 125). Holzasche mit Quarzsand in unterschiedlichen Verhältnissen gemischt, schmilzt oberhalb 1300 bis 1350 °C. Das gehäufte Auftreten von 1350 °C ist technisch bedingt, indem der verwendete Laborofen keine höhere Belastung im Dauerbetrieb zulies, bei Höchsttemperatur von 1350 °C aber noch nicht alle Ansätze vollständig in klares Glas übergegangen waren. Mit rund 1100 bis 1150 °C liegen die Schmelztemperaturen des Pottaschenglases wesentlich tiefer.

Mit Hilfe der lokalen Ausgangsmaterialien (Abb. 129) Asche (A, B), Pottasche (C), Huppererde (I) und Kalk (H) lassen sich rechnerisch Rezepturen für K-Ca-2 und K-Ca-3 ableiten (Abb. 129: Rezepturen, Nrn. 1–5, 8, 10).

Die 2002 gewonnenen und analysierten Buchen- und Nadelholzaschen von Court, Pâturage de l'Envers sind als Einzelproben möglicherweise nicht repräsentativ für die im 18. Jahrhundert verfügbare und verwendete Asche. Mit dieser aluminium- und eisenreichen Asche (Rezepturen, Nrn. 1–5) resultiert ein ebenfalls aluminium- und eisenreiches Waldglas, das nicht mit dem mittleren K-Ca-2-Glas (Code W) von Court, Pâturage de l'Envers übereinstimmt – ausser, die im Grabungsmaterial auftretende Fritte werde nicht als Halbfabrikat der Glasherstellung interpretiert, sondern als läuterndes Abfallprodukt der Glasherstellung selbst, als Schlacke somit (vgl. hierzu die Ausführungen zu «Fritte» in Kap. 4.2.3.5). Das K-Ca-2-Glas wäre demzufolge aus einer Mischung von ca. 50 % Buchen- und/oder Fichtenasche lokaler Herkunft und 50 % Huppererde regionaler Provenienz bei rund 1350 °C geschmolzen worden, wobei eine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -reiche, erst bei mehr

als 1400 °C schmelzende Schlacke abgeschöpft und entsorgt worden wäre (Fritte, bzw. Schlacke). Ob vor dem eigentlichen Schmelzprozess noch ein Fritten der Asche-/Sandmischung vorgenommen wurde, ist aus dem Fundmaterial nicht ableitbar, aber auch keineswegs auszuschliessen.

Mit einer aluminium- und eisenarmen und calciumreichen Asche vom Typus Kleinschlacke (Code D) liesse sich ein entsprechendes Waldglas herstellen (Rezeptur 6), aber bei diesem Herstellungsprozess würde weder ein aluminium- oder eisenreiches Halbfabrikat (Fritte *sensu stricto*) noch eine entsprechende Schlacke anfallen, wenn man ausschliessen will, dass die Schlacke ein Schmelzprodukt der Hafenwandung sein könnte.

Einfacher liegen die Verhältnisse beim technisch scheinbar aufwendigeren K-Ca-3-Glas/Pottaschenglas. Der läuternde Extraktionsprozess führt zu einem aluminium-, eisen-, mangan-, magnesium- und phosphorarmen Netzwerkbildner (Pottasche; Code C, E, G in Abb. 129), der zusammen mit geeigneter Zudosierung von Kalkmehl als Stabilisator zum netzwerkbildenden Quarzsand (Rezepturen, Nrn. 8–11) ein tiefschmelzendes und zugleich fast farbloses Glas ergibt (P). Das  $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ -Verhältnis ist mit drei Glasbildnern (Pottaschenextrakt, Kalk und Quarz) frei einstellbar. Während bei K-Ca-2-Glas Eisen Mangan überwiegt ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MnO}$ ), herrscht beim K-Ca-3-Glas Mangan in statistisch signifikanter Weise vor ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 < \text{MnO}$ ; vgl. auch Kap. 4.2.3.1, s.v. Exkurs: Manganoxid in der Glasproduktion), weil einerseits eisenarme Ausgangsmaterialien verwendet worden sind und andererseits MnO als Entfärbungsmittel zugegeben worden ist. In den Rezepturen Nummern 8–11 ist eine Zugabe von 0.5 % Braunstein eingefügt worden, um diesem Umstand Rechnung zu tragen.

Farbloses K-Ca-3 / Pottaschenglas *à la façon de Venise* ist, wie die vorliegenden Untersuchungen ergeben haben (s. auch Kap. 4.2.4.1), in Court, Pâturage de l'Envers mit Sicherheit hergestellt worden, während es von anderen Glashütten bisher allenfalls aus Frankreich<sup>360</sup> und dem Schwarzwald<sup>361</sup> bekannt ist.

360 Barrera/Velde 1989;  
Stern/Gerber 2009.

361 Maus/Jenisch 1997/98.



## 4.4 Zusammenfassung / Résumé / Summary

Yvonne Gerber und Willem B. Stern

### Zusammenfassung

Die archäometrischen Analysen von Bruchglas, Produktionsabfall und Produktionsresten, Ofenmaterialien und Rohstoffen lassen sich wie folgt zusammenfassen (s. dazu die in Kap. 4.1.1 aufgelisteten Fragen):

1. Beim analysierten Glas (Hohl- und Flachglas + Produktionsabfälle: n = 197) handelt es sich ausschliesslich um Kalium-Calcium-Glas (K-Ca-Glas); Natron-/Soda- oder Bleiglas wurde nicht angetroffen.
2. Die in Nähe der Glashütte aufgefundenen Glasfragmente weisen eine so geringe stoffliche Variationsbreite auf, dass sie nicht als zum Recycling herbeigeschafftes Altglas angesprochen werden können. Statistisch abgesicherte stoffliche Ähnlichkeiten mit den eigentlichen Produktionsresten aus dem Hüttenbereich legen eine Interpretation als Glasbruch des Hüttenbetriebes nahe.
3. Beim farblosen Bruchglas *à la façon de Venise* (Farblose Glasproben: n = 51; zusammengesetzt aus Hohlglas: n = 30, Produktionsabfall: n = 21) handelt es sich nicht um Natronglas, sondern gleichfalls um K-Ca-Glas des Typs K-Ca-3. Es macht rund 25 % der analysierten Hohl- und Flachgläser aus und rund 28 % der Produktionsreste. Unter dem analysierten Flachglas ist es nicht vertreten.
4. Dieses farblose Glas zeichnet sich gegenüber dem viel häufigeren grünlichen Waldglas durch einen niedrigen Phosphat-, Eisen- und Aluminiumgehalt sowie einen hohen Kaliumgehalt aus und ist als Pottaschenglas anzusprechen, hergestellt aus Aschenextrakt, reiner Huppererde (vgl. Nr. 6. unten) und Kalk (K-Ca-3-Glas). Es enthält durchschnittlich mehr Manganoxid als Waldglas, das heisst es wurde Mangan als Entfärbungsmittel in geringem Masse zugegeben.
5. Das mit Abstand häufigste Glas ist grün oder grünlich-gelblich gefärbt und entspricht dem aus der Literatur bekannten Waldglas (Grüne Glasproben: n = 121; zusammengesetzt aus Hohl- u. Flachglas: n = 81, Produktionsabfall: n = 36, Fritte: n = 4). Es weist einen hohen Phosphatgehalt ( $> 1$  Gew.-%  $P_2O_5$ ), einen hohen Eisengehalt ( $> 0.5$  Gew.-%  $Fe_2O_3$ ) und einen tiefen Kaliumgehalt (um 6 Gew.-%  $K_2O$ ) auf und wurde aus einer Mischung von Holz- asche und Quarzsand hergestellt und ist somit als K-Ca-2-Glas anzusprechen. Das blaue Glas (Blaue Glasproben: n = 30; zusammengesetzt aus Hohlglas: n = 7, Produktionsabfall: n = 14, Fritte: n = 9) weist gegenüber farblosen und grünen Gläsern einen erhöhten Kobalt-, Nickel- und Eisengehalt auf. Tatsächlich handelt es sich bei historisch genutzten Kobaltvererzungen wie jene aus dem Erzgebirge (Smalteproduktion seit 1635 aktenkundig) oder vielleicht dem Schwarzwald um Co-Ni-Mineralisationen. Die Verwendung von importierter Smalte als Zusatz zu relativ eisenreicher Asche und Sand liegt jedenfalls nahe.
6. Die chemisch und mineralogisch untersuchten eozänen Quarzsande aus der Gegend von Court zeigen eine beträchtlich stoffliche Variationsbreite. Aber sogenannte Huppererden mit 95 bis 98 Gew.-% Silicium ( $SiO_2$ ) sind in Court, Mont-Girod vorhanden. Ihr geringer Aluminiumgehalt ( $Al_2O_3$ ) passt zu den Gläsern von Court, Pâturage de l'Envers. Andere Huppererden, zum Beispiel von Souboz, weisen einen hohen  $Al_2O_3$ -Gehalt auf und sind für die Glasherstellung in Court, Pâturage de l'Envers nicht verwendet worden, wären aber möglicherweise für die Herstellung von Feuerfestkeramik geeignet.
7. Werden die aus den Quellen bekannten Glasrezepturen (1:1 Quarzsand zu Baum- asche) angewendet und mit den lokalen, analysierten Rohstoffen theoretisch berechnet, resultiert ein «hypothetisches Glas», das bezüglich der drei glasbildenden Hauptkomponenten Silicium ( $SiO_2$ ), Calcium ( $CaO$ ) und Kalium ( $K_2O$ ) dem Streubereich der analysierten Gläser von Court, Pâturage de l'Envers ähnelt. Wir dürfen davon ausgehen, dass sehr wahrscheinlich

alle in Court gefundenen bzw. analysierten Hohl- und Flachgläser aus regionalen Rohstoffen hergestellt worden sind, mit Ausnahme der färbenden und entfärbenden Komponenten wie Smalte oder Braunstein. Auch sind die in grosser Zahl gefundenen Produktionsabfälle (Pfeifenabschläge, Glastropfen und Glasbrocken), die mit den Hohl- und Flachgläsern stofflich übereinstimmen, weitere Belege für eine lokale Produktion.

8. Der Holzverbrauch für den Betrieb einer Waldglashütte geht zu einem kleinen Teil zu Lasten der Ofenfeuerung. Der grösste Teil entfällt auf das Brennen der Holz- asche zur Gewinnung des Netzwerkwandlers bzw. Flussmittels. Allgemein gültige und zugleich genaue Angaben zum Holzverbrauch sind für Court, Pâturage de l'Envers nicht möglich. Wenn von einer Rezeptur von 1 t Asche auf 500 kg Quarzsand ausgegangen wird, resultiert nach Verflüchtigung von CO<sub>2</sub> Wasser (= 500 kg Gewichtsverlust) eine Schmelze von rund 1 t K-Ca-2 / Waldglas. Aber bei Abschätzung des Holz- und Waldverbrauchs sind viele wesentliche Randbedingungen unbekannt und müssen geschätzt werden, wobei die Unsicherheiten/Variationsbreiten der einzelnen Schätzungen gross sind und ihre Summe entsprechend unsicher wird. Bei einer Betriebszeit von 15 Jahren und einer geschätzten Jahresproduktion von 20 t Glas (unter Berücksichtigung von Verlusten durch Produktionsabfälle) pro Jahr würde eine Waldfläche von 1 bis 3 km<sup>2</sup> durch Kahlschlag verbraucht; bei nachhaltiger Nutzung wäre die in Anspruch genommene Waldfläche erheblich grösser und der Transportweg des Holzes zur Glashütte entsprechend länger. Bei einer als kreisförmig angenommenen Rodungszone betrüge der Transportweg des Holzes 0.5 bis 1.5 km, vorausgesetzt dass im Nutzwald keine dezentrale Ascherei betrieben wurde. Ob bei nachhaltiger Nutzung im Wald dezentral Ascherei betrieben und statt Holz die leichte Asche über längere Wege zur Glashütte gebracht worden ist, muss mangels konkreter Fakten im gegenwärtigen Zeitpunkt offen bleiben.

9. Die Methode der Wahl für die chemischen Analysen fiel auf die wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenzspektrometrie (WD-RFA). Durch die Aufbereitung des Probenmaterials als Schmelzling sind die Homogenität der Proben und deren Homologisierung (Matrixangleichung durch Verdünnung) garantiert.

Die statistischen Auswertungen der chemischen Analysedaten stellen einen Kompromiss dar: Die Methodologie der *compositional data analysis* (CoDA) ist heutiger Wissensstand und *best practice*. Leider ist die Methodik auch mathematisch anspruchsvoll, noch selten Teil der üblichen statistischen Lehrprogramme und Software und in der Archäometrie bis anhin nur selten angewendet. Dies, obgleich sie die fundamentalen methodischen Probleme der statistischen Behandlung chemischer Analysedaten berücksichtigt. Daher mussten wir wesentliche Ergebnisse mit den Methoden der herkömmlichen multivariaten Statistik «übersetzen», wo dies möglich und adäquat schien. Die sehr moderate Vorgehensweise ist in der Einführung in Annex 1 erläutert und begründet. Die erhobenen chemischen Analysewerte, die in Annex 2 publiziert werden, ermöglichen zu jeder Zeit eine Überprüfung der statistischen Resultate sowie eine Neuevaluation mit grundlegend erneuertem statistischem Rüstzeug, sofern in Zukunft verlangt.

### Résumé

Les analyses archéométriques pratiquées sur les différentes catégories de verre (débris, déchets de fabrication et produits finis), les matériaux de construction des fours et les matières premières se résument de la manière suivante (voir aussi le catalogue des questions au début du chap. 4.1.1) :

1. Le corpus de verre analysé regroupe 197 tessons (verre creux, verre plat et déchets de production). Il s'agit uniquement de verre calco-potassique (K-Ca); aucun verre sodique ou au plomb n'a été identifié.
2. Les fragments de verre retrouvés autour de la halle verrière offrent une variation compositionnelle si ténue, qu'ils ne peuvent en aucune manière être interprétés comme du

matériau collecté à l'extérieur du site à des fins de recyclage. Au contraire, la similitude de leur composition avec celle des produits mêmes de l'atelier suggère que les débris ont servi de groisil.

3. Les débris de verre incolore à la façon de Venise (51 échantillons incolores, dont 30 de verre creux et 21 déchets de production) n'ont aucune affinité avec les verres au natron ; il s'agit, là aussi, de verre calco-potassique, plus précisément du type K-Ca-3. Cette catégorie représente 25 % du corpus de verres creux et plats analysés, et 28 % des déchets de production. Ce type de verre n'est pas représenté au sein du verre plat.
4. Par rapport au verre commun de couleur verte beaucoup plus fréquent, ce verre incolore se distingue par un faible taux de phosphate, fer et aluminium, et un taux marqué de potassium. Il est à considérer comme verre potassique élaboré à partir de cendres lessivées, de sable quartzique pur (Hupper, voir point 6 ci-dessous) et de chaux (verre type K-Ca-3). En moyenne, il comporte plus d'oxyde de manganèse que le verre ordinaire, ce qui suppose que du manganèse, utilisé comme décolorant, a été ajouté en faible quantité à la composition.
5. Le verre de loin le plus représenté est de couleur verte ou vert-jaune ; il correspond au verre ordinaire, le Waldglas de la littérature allemande, que l'on dénomme parfois « verre de forêt » (121 échantillons de verre vert, dont 81 de verre creux ou plat, 36 déchets de production et 4 frites). Il se distingue par un taux de phosphate élevé ( $> 1\%$  en poids de  $P_2O_5$ ), un taux de fer élevé ( $> 0.5\%$  en poids de  $Fe_2O_3$ ) et un faible taux de potassium (env.  $6\%$  en poids de  $K_2O$ ). Découlant d'un mélange de cendres de bois et de sable quartzique, on désigne ce verre calco-potassique par K-Ca-2. En comparaison aux verres incolore et vert, le verre bleu (30 échantillons de verre bleu, dont 7 de verre creux, 14 déchets de production et 9 frites) présente un taux de cobalt, de nickel et de fer élevé. En fait, il s'agit ici de minerais de cobalt, dont l'exploitation historique est attestée, comme ceux des Monts Métallifères (production d'émaux dès 1635) ou peut-être ceux de Forêt-Noire, et qui sont composés de minéralisations Co-Ni. L'utilisation d'émaux importés dans une composition de cendre relativement riche en fer et de sable conviendrait également.
6. L'étude chimique et minéralogique des sables quartziques éocènes de la région de Court révèle une variabilité compositionnelle importante. Mais les sables du Hupper composés de 95 à 98 % en poids de silice ( $SiO_2$ ) existent à Court, Mont-Girard. Leur faible taux d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) convient aux verres de Court, Pâturage de l'Envers. D'autres sables du Hupper, à l'image de ceux de Souboz, présentent une teneur élevée en  $Al_2O_3$  et n'ont de ce fait pas servi à la fabrication de verre à Court, Pâturage de l'Envers, mais auraient convenu à la confection de céramique réfractaire.
7. En partant des recettes mentionnées dans les sources (rapport sable/cendre de bois de 1:1) et en y introduisant les données théoriques obtenues sur les matériaux locaux, il résulte un « verre hypothétique » qui, du point de vue des trois composants principaux – silicium ( $SiO_2$ ), calcium ( $CaO$ ) et potassium ( $K_2O$ ) – correspond à l'éventail des verres analysés de Court, Pâturage de l'Envers. Nous pouvons partir du principe que probablement tous les verres creux et plats de Court mis au jour, respectivement analysés, ont été produits à partir de matières premières locales, à l'exception des éléments colorants et décolorants, tels les émaux ou le minerai de manganèse. A cet égard, le grand nombre de déchets de production retrouvés (meules, gouttes et gros morceaux de verre), dont la composition coïncide avec celle des verres creux et plats, constituent d'autres preuves attestant d'une production locale.
8. Dans l'exploitation d'une verrerie forestière, le bois destiné à l'alimentation des fours ne représente qu'une petite partie de la consommation totale. L'essentiel est englouti par la production de cendre qui sert de fondant. Aucune indication précise et valable quant à la consommation de bois n'est disponible pour Court, Pâturage de l'Envers. Si l'on part d'une recette de 1 t de

cendre pour 500 kg de sable vitrifiable, on obtient après volatilisation du  $\text{CO}_2$  (=perte de 500 kg de poids) une masse fondue de près 1 t de verre calco-potassique ordinaire (K-Ca-2). Quant à l'évaluation de la consommation de bois et de forêt, de nombreux paramètres importants restent inconnus et doivent être estimés. Les incertitudes/variations de chaque estimation étant grandes, leur somme n'en devient par conséquent que moins sûre. Pour une durée d'exploitation de quinze ans et une production annuelle estimée à 20 t de verre (déchets et débris de production compris), les besoins en forêt, exploitée en coupe rase, devaient osciller entre 1 et 3  $\text{km}^2$ . En admettant une exploitation plus durable du boisement, la superficie nécessaire augmente notablement ainsi que les trajets d'acheminement du bois vers la verrerie. Dans le cas d'une zone de déboisement circulaire, le trajet d'acheminement du bois aurait atteint entre 0,5 et 1,5 km, à condition que la transformation en cendre ne se soit pas déroulée dans la forêt exploitée. Quant à savoir si, dans le cas d'une exploitation durable de la forêt, la production de cendre aurait pu être décentralisée, et qu'en lieu et place du bois on ait livré à la verrerie, malgré des chemins plus longs, la cendre légère, la question reste actuellement pendante faute d'informations concrètes.

9. Dans le cadre des analyses chimiques, la méthode retenue fut la spectrométrie de fluorescence X par analyse dispersive (WD-XRF). Grâce à la transformation des échantillons en pastilles fondues, l'homogénéité des échantillons et leur homologation (ajustement des matrices par dilution) était garantie. L'exploitation statistique des données d'analyses chimiques représente un compromis : la méthodologie de la *compositional data analysis* (CoDA), conformément aux connaissances actuelles, constitue une bonne pratique. Malheureusement, la méthode, encore peu courante, est très exigeante d'un point de vue mathématique. Elle fait rarement partie des programmes communs d'enseignement statistique et des logiciels, et reste jusqu'ici peu appliquée en archéométrie. Et cela, malgré

qu'elle tienne compte des difficultés méthodiques fondamentales du traitement statistique de données d'analyses. Aussi avons-nous dû « traduire », quand cela paraissait possible et adéquat, des résultats essentiels au moyen de méthodes de la statistique multivariée traditionnelle. Cette approche très modérée est expliquée et décrite dans le « Précis d'analyse statistique » (Annexe 1).

Les valeurs des analyses chimiques rassemblées, publiées dans une table (Annexe 2), rendent possible le contrôle des résultats statistiques ainsi qu'une nouvelle évaluation au moyen de tout outil statistique fondamentalement nouveau, si tant est que le besoin s'en fasse sentir à l'avenir.

*Traduction Christophe Gerber, SAB*

### Summary

The archaeometric analyses of broken glass, waste and scraps from the production, furnace remains and raw materials can be summarised as follows (see also the listed questions at the beginning of chapter 4.1.1):

1. The corpus analysed (hollow and flat glass + production waste:  $n = 197$ ) consists exclusively of potassium-calcium glass (K-Ca glass); no natron/soda or lead glass was identified.
2. Glass fragments found around the glasshouse offer such a minor compositional variation that they cannot be interpreted as old glass collected off-site for recycling. The statistically confirmed similarity of their composition with the production waste of the glasshouse suggests that they were used as cullet in the workshop.
3. Fragments of colourless glass in the Venetian manner (colourless samples:  $n = 51$ ; comprising hollow glass:  $n = 30$ , and production waste:  $n = 21$ ) are not natron glass but again potassium-calcium glass from the K-Ca-3 type. This category represents around 25 % of the corpus of hollow and flat glass analysed and 28 % of production waste. This type of glass is not represented in the flat glass analysed.
4. Compared to the much more common green forest glass, this colourless glass is characterized by a low phosphate, iron and



aluminium content, and a marked rate of potassium. It can be described as potash glass made from leached ashes, pure quartz sand (see point 6 below) and lime (K-Ca-3 glass). It contains on average more manganese oxide than forest glass, which indicates that manganese was added in small quantities to the composition as a bleaching agent.

5. Green or yellow-green coloured glass, known in the literature as forest glass (green glass samples:  $n = 121$ ; comprising hollow and flat glass:  $n = 81$ , production waste:  $n = 36$ , and frit:  $n = 4$ ), is by far the most common. It is characterised by a high phosphate ( $> 1$  wt-% of  $P_2O_5$ ), high iron ( $> 0.5$  wt-% of  $Fe_2O_3$ ) and low potassium (about 6 wt-% of  $K_2O$ ) content. Made from a mixture of wood ash and quartz sand, it is therefore a K-Ca-2 glass. Compared to the colourless and green glass, the blue glass (blue glass samples:  $n = 30$ ; comprising hollow glass:  $n = 7$ , production waste:  $n = 14$ , and frit:  $n = 9$ ) shows a higher cobalt, nickel and iron content. Historically used cobalt deposits, such as the ones in the Ore Mountains (where smalt production is attested since 1635) or perhaps the Black Forest, are in fact mineralised Co-Ni. The addition of imported smalt to the relatively iron-rich ash and sand is likely.
6. The chemical and mineralogical investigation of Eocene quartz sands from the Court area reveals a significant compositional variability. But so-called Huppererde composed of 95 to 98 wt-% of  $SiO_2$  exist in Court, Mont-Girod. Its low  $Al_2O_3$  content fits the glasses from Court, Pâturage de l'Envers. Other quartz sands like those of Souboz have a high  $Al_2O_3$  content and were not used in the production of glass in Court, Pâturage de l'Envers, but would be suited to the making of refractory ceramics.
7. Starting from the glass recipes known from the written sources (equal parts of quartz sand and wood ash) and calculating them theoretically with the properties of local raw materials, we obtain a "hypothetical glass" which resembles the analysed glass of Court, Pâturage de l'Envers regarding its three main components: silica ( $SiO_2$ ), calcium ( $CaO$ ) and potassium ( $K_2O$ ). It can be assumed that all hollow and flat glass found and analysed in Court, Pâturage de l'Envers were most likely produced from local raw materials, apart from the colouring and bleaching components such as smalt or manganese ore. The numerous pieces of production waste (moils, drops and chunks of glass) whose composition coincides with that of hollow and flat glass are further evidence attesting to a local production.
8. Only a small part of the wood consumed by a forest glasshouse goes into fuelling the furnace. Most of it is swallowed by the burning of ash to extract the flux. No accurate data on the consumption of wood is available for Court, Pâturage de l'Envers. Assuming a recipe of 1 t of ash per 500 kg of sand, a melt of about 1 t of ordinary potassium-calcium glass (K-Ca-2/forest glass) after the volatilization of  $CO_2$  and water (= loss of 500 kg) would be obtained. Many important parameters are unknown and must be estimated in the evaluation of wood and forest consumption. The uncertainties/variations of each estimate are great and their sum is as a result correspondingly unreliable. For an operating period of fifteen years and an estimated annual production of 20 t of glass (waste and scraps from the production taken into account), a forest area ranging from 1 to 3 km<sup>2</sup> would be clear-cut every year; assuming a more sustainable forest management, the area required would increase significantly, as would the transport distance of the wood to the glasshouse. In the case of a circular area of deforestation, the transport distance would have been between 0,5 and 1,5 km, provided that no decentralized ash transformation was taking place. Whether, in the case of a sustainable use of the forest, the production of ash could be decentralized and the lighter product delivered to the glasshouse despite increased transport distance remains open in the absence of concrete evidence.
9. The method used in the chemical analysis was wavelength dispersive X-ray

fluorescence (WD-XRF). Sample homogeneity and synthesis were guaranteed by the processing of the samples in melted discs (matrix assimilation by dilution). The statistical analyses of chemical data represent a compromise: The methodology of compositional data analysis (*CoDA*) is *state of the art* and *best practice*. Unfortunately, this method is challenging from a mathematical point of view, rarely part of the standard statistical teaching programs and software, and so far little used in archaeometry. Even though it takes into account the basic methodical difficulties in the statistical treatment of chemical data. Thus, key results were “translated”, when it seemed possible and appropriate, using traditional multivariate statistical methods. This very moderate approach is explained and substantiated in the introductory annex 1. The values of chemical analyses collected and published in annex 2 allow a review of the statistical results at any time, as well as a reassessment with any new statistical tools if required in the future.

*Translation*

*Lara Tremblay and Regula Gubler, ADB*

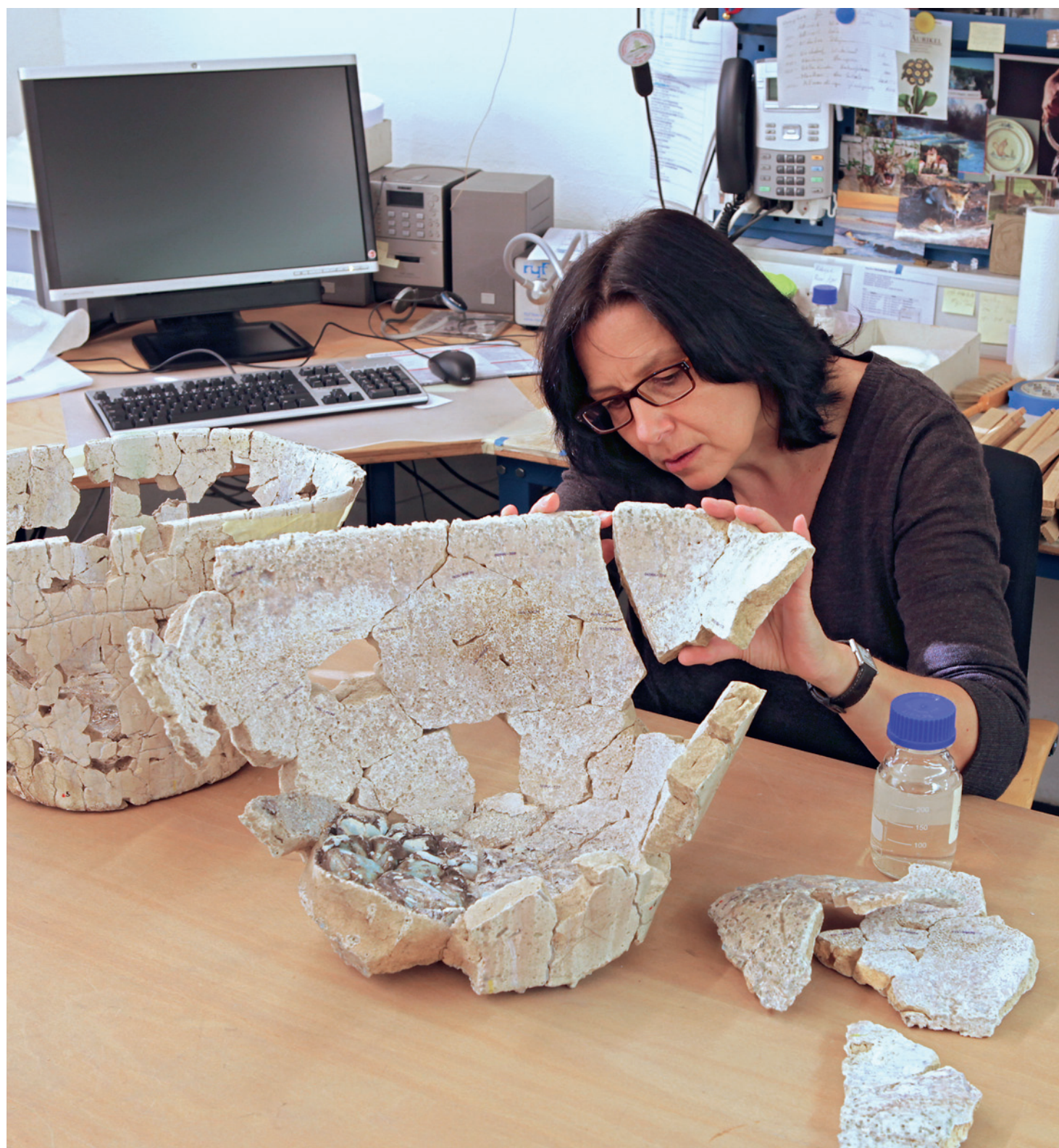
## 4.5 Wir danken

Herrn Heinz Hürlimann, bis 2003 Geochemisches Labor, Universität Basel; den Teilnehmern des Archäometrie-kurses Nr. 6407 im Sommer 2002, Universität Basel; Herrn Dr. Daniel Keller, Departement Altertumswissenschaften, Klassische Archäologie, Universität Basel, für seine kritischen Anmerkungen und zahlreichen Hinweise; Herrn Stefan Bucher für die Herstellung von Glasproben-Schmelzlingen (WD-XFA), Geochemisches Labor, Universität Basel; Herrn Chris Lucianu, Basel, für statistische Beratung; Herrn Dr. Hans Heiner Klein und Frau Nadine Klein Vischer, Basel, für Buchenholzasche aus Kleinlützel SO; *intra muros*-Finanzierung durch den Archäometrie-Fonds des Geochemischen Labors, Universität Basel.



## 5. Four de fusion, creusets et pots de cuisson

Laetitia Kaiser, Giacomo Eramo, Christophe Gerber et Jonathan Frey



## 5.1 Principes technologiques de base

Giacomo Eramo<sup>362</sup>

La fabrication du verre était et reste un cycle de production à haut contenu technologique. Comme la métallurgie, il exige une transformation complète des matières premières. En dépit d'une abondante documentation historique relative à la fabrication de verre, de l'Égypte antique jusqu'à la Révolution industrielle, de nombreux aspects de l'évolution technologique du verre demeurent toujours dans l'ombre. La majeure partie des études portant sur la fabrication du verre antique sont centrées sur la caractérisation du verre en lui-même. Proportionnellement, les travaux archéométriques relatifs aux outils de la production verrière restent rares. Si la composition du verre a évolué au fil du temps, parfois de façon différenciée selon les régions géographiques, la technologie de production a, elle aussi, connu un développement remarquable.

De l'Antiquité jusqu'au Haut Moyen Âge, la composition du verre est restée calcique-sodique<sup>363</sup>. Dans les régions centrales de l'Europe occidentale, l'utilisation de la cendre de bois, en lieu et place de cendre tirée de plantes halophytes, a engendré un changement dans la composition du verre : l'oxyde de potassium ( $K_2O$ ) s'est substitué à l'oxyde de sodium ( $Na_2O$ ) comme fondant. Contrairement à ce qui a été observé en France méridionale et en Italie septentrionale, il semble que le verre calco-potassique apparaisse dès la période carolingienne en Europe centrale<sup>364</sup> ; sa production s'est ensuite étendue, dès le Bas Moyen Âge, à toute l'Europe septentrionale grâce au développement des verreries forestières. Le bois servait non seulement de combustible, mais aussi et surtout à la production de cendres, utilisées comme fondant et stabilisant dans le verre. Michel<sup>365</sup> a estimé que près de 90 % du bois exploité a été employé pour la production de la cendre et moins de 10 % était utilisé comme combustible. Le verre ainsi produit, le bien nommé « Waldglas » ou « verre de forêt », révèle, outre une couleur verte commune, une composition chimique assez similaire à travers l'Europe continentale<sup>366</sup>. L'épuisement des

bois, due à une exploitation intense, et la difficulté d'approvisionnement ont conduit les verriers à trouver d'autres combustibles, comme le charbon ou la tourbe. Alors que cette mutation s'est opérée dès la seconde moitié du 17<sup>e</sup> siècle en Angleterre, la plupart des verreries continentales continuaient de fonctionner au bois, et ce parfois jusqu'à la fin du 19<sup>e</sup> siècle<sup>367</sup>. La pénurie de bois a contraint les verriers à trouver des produits de remplacement, même pour la cendre.

Dans la mesure où l'industrie ne fut capable de produire de grandes quantités de carbonate de sodium artificiel qu'à partir de la première moitié du 19<sup>e</sup> siècle, les verreries axées sur le verre sodique, ont employé jusque-là des cendres tirées de plantes côtières<sup>368</sup>, qu'elles faisaient venir souvent à grand prix, en particulier d'Espagne. Comme de manière générale la composition du verre commun, de type calco-potassique, nécessite des températures de fusion plus élevées que celle du verre calco-sodique<sup>369</sup>, de nouveaux défis technologiques se sont posés aux verriers : élever la température du liquidus, élaborer une pyrotechnologie plus avancée et développer des outils de production plus performants.

Des preuves historiques et archéologiques de ces changements technologiques sont perceptibles dans les anciens traités relatifs à la production du verre, ainsi que dans les différences typologiques observées tant sur les fours relevés que sur le matériel archéologique collecté dans les verreries fouillées<sup>370</sup>. Parmi les outils de production, les fours de fusion et les céramiques techniques sont particulièrement utiles pour évaluer l'évolution de la technologie verrière. Bien que les fours à fritte et les arches à recuire aient été également présents dans les verreries, leurs performances thermiques étaient inférieures à celles du four de fusion, donc moins significatives d'un pur point de vue pyrotechnologique.

Dans les verreries, les creusets, à l'instar du four de fusion, ont toujours fait l'objet de soins particuliers. Ceci explique que les matériaux de construction destinés au four de fusion et les creusets aient été presque exclusivement préparés dans les verreries mêmes ; leur fabrication étant parfois complémentaire de la production de verre<sup>371</sup>. Creuset et four de fusion peuvent être considérés comme deux élé-

362 Les initiales de l'auteur suivent les en-têtes de chapitres à chaque fois que le contributeur change.

363 Foy 1989, 32-33 ; Nenna/Vichy/Picon 1997 ; Foy/Picon/Vichy 2000, 431 ; Freestone, 2002 ; Whitehouse 2003 ; Henderson/McLoughlin/McPhail 2004 ; Brill 1999 ; Wedepohl 2001.

364 Wedepohl 2001, 261.

365 Michel 1989, 174. Voir les estimations plus raisonnables de Gerber aux chap. 2.1.2.5 et 2.1.6.

366 Kuisma-Kursula/Räisänen/Matiskainen 1997 et Wedepohl 2001.

367 Cable 1998.

368 Pris 1975, 390-401 ; Frank 1982, 21. Voir aussi Chopinet (à paraître) sur : [http://www.verre-histoire.org/colloques/innovations/pages/p302\\_01\\_chopin.html#r1](http://www.verre-histoire.org/colloques/innovations/pages/p302_01_chopin.html#r1) (page consultée le 2.10.2012).

369 Température de 900-1100° C pour le verre calco-sodique ; Rehren 2000, 1228-1229 ; Shugar/Rehren 2002, 149-150.

370 Charleston 1978 ; Horat 1991.

371 Michel 1989.



ments d'un même système. En effet, ils fournissent des informations complémentaires sur les matières premières utilisées, sur les températures atteintes et sur leurs mécanismes de détérioration durant leur utilisation. Afin de bien comprendre les différents procédés de fabrication du verre, un bref rappel de sa technologie est nécessaire.

Tout d'abord, il est important de savoir que la composition du verre détermine ses propriétés physiques. La modification d'une seule propriété influe sur toutes les autres. Pour décrire d'une façon simplifiée la composition chimique d'un verre silicaté, il faut tenir compte de trois composants fondamentaux : le vitrifiant, le fondant et le stabilisant. Le verre de forêt, au-delà de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) présente comme vitrifiant, est caractérisé par une composition calcique-potassique. L'oxyde de potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ ) joue le rôle de fondant et la chaux ( $\text{CaO}$ ), celui de stabilisant. En général, la recette de base pour le verre forestier prévoyait l'utilisation de sable de quartz pur et de cendres de bois, plus particulièrement de fougères – quand elles sont disponibles – mais aussi d'orme, de hêtre, de chêne ou de charme. La composition de la cendre varie en fonction de l'espèce végétale, du sol et des modalités de combustion, mais son apport chimique<sup>372</sup> est surtout constitué par du  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et/ou  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , etc.

En principe, les matières premières, qui forment la composition, sont mélangées et subissent un grillage dans un four secondaire, nommé four à fritter ou four à fritte. Ce mélange calciné et partiellement fondu, qui porte le nom de fritte, est sorti du four, broyé et déposé dans des creusets, afin d'être transformé en verre fondu. Une fois la fusion du mélange effectuée, le verrier pouvait cueillir le verre et le souffler à l'aide de sa canne. L'objet terminé était ensuite porté à l'arche à recuire, une chambre chauffée accolée au four de fusion, où son exposition à une température dégressive lui permettait de relâcher les tensions accumulées durant le formage, et lui conférait ainsi une meilleure résistance mécanique.

La composition chimique et les propriétés physiques du verre sont strictement liées à la pyrotechnologie mise en œuvre pour le produire. C'est pour cette raison que dans l'évolution de la technologie verrière, les change-

ments de pyrotechnologie importants sont étroitement liés aux modifications apportées dans la composition du verre<sup>373</sup>. Fondamentalement, un four est un contenant dont la fonction est de réduire au maximum la dispersion de la chaleur fournie par un combustible. Évidemment, pour obtenir un équilibre thermique positif, la quantité de chaleur entrante doit toujours être supérieure à la quantité sortante ou perdue. Les principaux responsables de la perte de chaleur sont : la structure et les objets eux-mêmes (four, creusets) qui absorbent et dispersent la chaleur par contact, et les gaz chauds qui s'échappent du four. Ainsi, plusieurs paramètres peuvent affecter la capacité thermique (isolation) d'un four : les dimensions, l'épaisseur des parois, les ouvertures et l'étanchéité des parois.

Enfin, il convient de ne pas oublier la variable combustible. En brûlant, le bois dégage de la chaleur et produit des flammes plus ou moins longues. L'intensité du feu et la durée de combustion varient selon les essences utilisées. Certaines comme le hêtre sont préférées car elles génèrent une chaleur intense régulière ; les résineux sont moins recherchés car ils éclatent au feu (risque de pollution du verre fondu) et se consomment vite. La taille des bûches et le degré de siccité sont d'autres facteurs importants dans la gestion du feu.

## 5.2 Matières premières

Généralement, la forme et la taille déterminent l'efficacité calorifique d'un four. Le plan ovale de la chambre centrale suppose l'existence d'une voûte qui clôt la structure. Cette forme occasionne un rapport entre surface et volume intérieurs inférieur à celui d'une chambre de forme cubique ou prismatique, et est garante d'une meilleure réflexion de l'énergie (four de type dit réverbère). La forme et le volume intérieur du four peuvent influencer sur son tirage. Mais comme en général seules les fondations des fours sont conservées en contexte archéologique, il est difficile de déterminer l'impact de ces deux variables. Il en va de même pour l'épaisseur de la voûte, qui n'a jamais été observée dans sa totalité en fouille archéologique. La paroi contribue à l'isolation thermique du four, mais des murs très épais peuvent provoquer

372 Misra/Ragland/Baker 1993 ; Smedley/Jackson 2002 ; Stern/Gerber 2004b.  
373 Piganiol 1965 ; Charleston 1978 ; Cable 1998.

la surchauffe de la structure et ainsi l'endommager. Les ouvertures perçant la chambre centrale, réduisent l'isolation thermique et provoquent des pertes de chaleur, par la sortie de gaz chauds et d'une partie de l'énergie radiante.

La première étape dans l'installation d'une manufacture de verre est de construire les fours et de réaliser les creusets<sup>374</sup>. Les fours sont chauffés de façon graduelle jusqu'à leur température de fonctionnement individuelle. De cette façon, les structures perdent lentement leur teneur en eau et atteignent une certaine stabilité sans effort soutenu. Selon les auteurs, la durée du chauffage préliminaire oscillait entre quelques semaines et plusieurs mois<sup>375</sup>. Les premières réactions minéralogiques, telles que la déshydroxylation des minéraux argileux, puis la sintérisation du matériel réfractaire et de l'argile riche en fer, ont provoqué le durcissement de la structure entière, transformée en un corps solidaire.

Nous avons vu que différentes sources historiques déclarent que le bois était le combustible préféré pour ce type de four, et ce jusqu'à la fin du 18<sup>e</sup> siècle. L'utilisation croissante de charbon dans certaines contrées a provoqué des changements dans l'agencement des fours et dans la manière de produire le verre<sup>376</sup>. Comme nous l'avons énoncé précédemment, le four en coupole ou four réverbère nécessite une énergie radiante pour fonctionner : une voûte permet de renvoyer la chaleur et le rayonnement vers le bas, sur les creusets placés sur des banquettes latérales. Dans le cas d'un mélange de sable et de cendre, la transmission de la chaleur par rayonnement est plus efficace que par conduction en raison de la faible densité du mélange (porosité d'environ 50 %) et de sa basse conductivité thermique. Un mélange granulaire offre une plus grande surface de contact et emmagasine plus facilement la chaleur émise par rayonnement<sup>377</sup>. L'énergie de rayonnement était assurée par des flammes longues et vives capables de produire la fusion du verre. Comme le charbon de bois et le charbon fossile comportent trop peu de matière volatile pour produire une longue flamme durant leur combustion<sup>378</sup>, les fours opérant avec ces combustibles doivent être munis d'une soufflerie<sup>379</sup>. Au contraire, le bois, dont 65 à 85 % du

poids est formé de matières volatiles<sup>380</sup>, libère pendant sa combustion une longue flamme incandescente.

Le pouvoir calorifique du bois et la teneur chimique des cendres peuvent varier de façon considérable en fonction de l'espèce végétale, de l'âge du sujet et des parties utilisées, mais aussi du climat, de l'exposition<sup>381</sup>. En général, le pouvoir calorifique du bois est plus bas que celui des combustibles fossiles<sup>382</sup>. Quant aux températures de flamme mesurées pour les bois, elles varient entre 1000 et 1800° C<sup>383</sup> et dépendent du pouvoir calorifique (environ 20 MJ/kg), de la teneur en eau, du taux d'oxygène disponible pendant la combustion et de la température de l'air à l'intérieur du four. La teneur en eau peut avoir un effet sérieux sur la température de flamme d'une biomasse, ce qui explique que les verriers aient utilisé du bois sec ou même, dans certains cas, séché le bois dans des fours spécifiques avant de l'utiliser ; ce fut particulièrement le cas du bois flotté<sup>384</sup>. Le séchage provoque un rétrécissement des billes de bois et augmente simultanément sa réactivité pendant la combustion et la température de flamme<sup>385</sup>.

La combustion est une réaction entre le carbone du bois et l'oxygène de l'air ambiant. Un apport excessif d'oxygène (tirage trop intense) entraîne une réaction incomplète et se manifeste par la présence d'oxygène non réagi dans les gaz à la sortie du four. La disposition du bois dans l'alandier, tout comme la température de l'air, peuvent influencer le tirage et la cinétique de la combustion. En outre, la vitesse de l'air (tirage) et la taille des bois utilisés affectent la quantité de chaleur dégagée pendant la combustion. Puisque la combustion est une réaction de surface, une augmentation de la surface de contact (usage de morceaux de bois refendus) augmente la cinétique de combustion. Afin d'obtenir un échauffement régulier, les quartiers de bois ont été fendus dans des billes écorcées de taille similaire<sup>386</sup>. Le fonctionnement ininterrompu du four de fusion durant la période de production permettait d'épargner du bois et d'optimiser la production, car porter un four froid à bonne température nécessite énormément d'énergie. Les anciens traités de Théophile et d'Agricola notamment, précisent l'organisation journa-

374 Biringuccio 1540/1977, 129; Michel 1989, 223.

375 Pris 1975, 434-435; Michel 1989, 222.

376 Charleston 1978, 30-32. 377 Rehder 2000, 51.

378 Rehder 2000, 32.

379 Piganiol 1965, 97-100.

380 Tillman 1978, 77-83; Rehder 2000, 28-30.

381 Nurni 1997, 23.

382 Tillman 1978, 67.

383 Tillman 1989, 104.

384 Michel 1989, 230; Cable 1998, 327.

385 Tillman 1991.

386 Michel 1989, 230; Cable 1998, 327.

lière du travail : la fusion des compositions vitrifiables se faisait la nuit et le soufflage du verre la journée.

Quand, en verrerie, on parle de four de fusion, il est impératif de tenir compte des creusets comme partie intégrante du four. Ceux-ci, en effet, ont une incidence aussi importante que le four de fusion lui-même. Un bon creuset est caractérisé par un bon comportement réfractaire (point de ramollissement élevé), par l'absence de toute contamination chimique (concentration très basse des métaux de transition) et une bonne résistance mécanique (résistance aux chocs thermiques). La technique de production des creusets dépend de la composition du verre. Au cours de l'époque romaine, le verre a connu des températures de liquidus plus basses qu'au Moyen Âge, ce qui explique que des céramiques communes aient pu servir de creusets<sup>387</sup>. Au Moyen Âge, les creusets utilisés étaient produits à partir de terres silicatées capables de résister à des températures élevées.

Dès cette époque, les traités sur le verre ont discuté des creusets en tant qu'outils fondamentaux dans l'obtention d'un verre de qualité : Théophile (12<sup>e</sup> siècle) a suggéré de faire des creusets avec une argile blanche puis de les porter au feu dans un four incandescent. Dans son ouvrage *De la pirotechnia*, Biringuccio mentionne que les creusets et le revêtement réfractaire interne du four de fusion sont à réaliser dans une argile résistante au feu identique (argile de Valence ou argile de Treguanda). Après une longue période de séchage (six à huit mois), les creusets ont été chauffés dans le four à fritter jusqu'au rouge incandescent, puis rapidement déplacés, au moyen de pinces, dans le four de fusion pour leur cuisson à haute température. A ce stade, ils pouvaient servir à fondre le mélange vitrifiable. Merret, dans sa traduction de *L'Arte vetraria* de Neri, cite un gisement d'argiles réfractaires en Angleterre et décrit la manière de les traiter pour obtenir de bons creusets. En outre, le même auteur fait une distinction entre grands pots pour le *cristallo* et petits pots pour le verre coloré. Le volume 17 de l'*Encyclopédie méthodique* éditée par Diderot et d'Alembert consacre plusieurs articles relatifs au verre et à la verrerie. En plus d'une description de la chaîne opératoire, ils décrivent les modes de construction

des fours et la manière de réaliser les pots. La réutilisation de creusets pilés, en tant que dégraissant, dans l'argile destinée aux nouveaux creusets et aux briques de fours y est suggérée, afin de réduire le risque de rétrécissement de la pâte. Quant à la cuisson des matériaux, il est conseillé de la réaliser en deux étapes, à l'image de ce que rapportait déjà Biringuccio. Ces auteurs recommandent par ailleurs un soin particulier dans la réalisation des creusets et du four de fusion.

Les températures de liquidus plus élevées du verre de forêt ont nécessité des développements technologiques et pyrotechnologiques, parmi lesquels une amélioration qualitative sensible des matières premières mises en œuvre et une exploitation plus efficace des combustibles. L'interdépendance technologique étroite qui existe entre la composition vitrifiable, les creusets et le four de fusion nous poussent à les considérer comme parties d'un seul et même système. C'est ce qui explique sans doute que dans le cas des verreries modernes d'Europe continentale, chacune de ces parties ait fait l'objet d'un soin particulier par les verriers eux-mêmes<sup>388</sup>.

## 5.3 Etat de la recherche

Laetitia Kaiser

L'approche archéométrique de la fabrication du verre est, depuis tout temps, principalement centrée sur les aspects de composition. Par contre, peu d'investigations ont été entreprises dans le domaine de la céramique technique (creusets et pots à recuire) et des fours. Bien que la littérature archéologique soit assez abondante au sujet des divers types de fours de verrier, peu d'études archéométriques se sont préoccupées des matériaux mis en œuvre dans la construction desdits fours. La caractérisation pétrologique (ou pétrographique) et chimique des éléments de fours, des céramiques techniques et du verre peut fournir des données qualitatives et quantitatives utiles à la connaissance de la fabrication du verre dans le passé. Dans cet esprit, nous livrons ci-dessous une synthèse des recherches archéométriques

387 Cool/Jackson/Monaghan 1999, 150-154 ; Amrein 2001, 81-85 ; Jackson et al. 2003, 440-443.

388 Piganiol 1965, 93-94 ; Michel 1989, 217-219 ; Brumm 2003, 69-75.

menées sur les fours et les céramiques techniques des verreries forestières de Court, Sous les Roches<sup>389</sup> (1673-1699) et de Court, Pâturage de l'Envers (1699-1714), dans le vallon de Chaluët. Ces résultats sont le fruit d'une étude intégrée pour une part dans une thèse de doctorat réalisée au Département des Géosciences de l'Université de Fribourg<sup>390</sup>. Les données pétrographiques, minéralogiques et chimiques qui concernent le four de fusion et les creusets de Pâturage de l'Envers ont été publiées en 2005 et 2006<sup>391</sup>. L'analyse et la comparaison des argiles réfractaires du Sidérolithique affleurant dans le Jura bernois a été traitée séparément<sup>392</sup>. Les résultats des analyses réalisées sur les briques du four secondaire A164 et les céramiques techniques destinées à la cuisson du verre du Pâturage de l'Envers sont inédits. Ils sont présentés dans les chapitres 5.7.6 et 5.9.5, tandis que leur discussion est abordée, conjointement aux autres résultats, dans le chapitre 6.2.

## 5.4 Hypothèses et problématiques

Giacomo Eramo

En Europe, on observe entre les 18<sup>e</sup> et 19<sup>e</sup> siècles, une modification dans la composition des verres découlant notamment de l'usage de matières premières nouvelles et de l'emploi de combustibles fossiles. Parallèlement, l'outil de production évolue et voit le passage de la verrerie forestière à la manufacture de grande taille, synonyme d'un glissement de la production artisanale vers une production industrielle. A l'image de l'Europe verrière, le Jura connaît un développement de l'industrie du verre entre les 17<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> siècles, en raison de l'existence de gisements de sable vitrifiable et de terres réfractaires de qualité, ainsi que de vastes forêts peu exploitées. Par contre, les changements technologiques observés à cette époque dans les verreries françaises et anglaises ne sont pas perceptibles avant le milieu du 18<sup>e</sup> siècle<sup>393</sup> en terre jurassienne. A ce titre, la verrerie dite de Roches (Rebeuvelier JU, 1799-1889) révèle des éléments nouveaux, comme la taille de l'installation, le type

de fours utilisés, le changement de combustible et de fondant<sup>394</sup>. À l'heure actuelle, elle représente le seul exemple archéologique qui peut contribuer à la compréhension du phénomène de l'industrialisation de la production verrière dans le Jura suisse.

Les deux aspects technologiques caractéristiques de la production verrière sont la pyrotechnologie et la composition vitreuse. La pyrotechnologie concerne à la fois le four et le combustible. La morphologie et le plan du four dépendent étroitement du combustible utilisé. Dans la plupart des cas, le mauvais état de conservation des structures empêche de comprendre clairement la fonction et l'usage des fours. Afin de tenter d'améliorer les connaissances technologiques de la production verrière du Jura suisse, une étude archéométrique centrée sur les fours et les céramiques techniques issues des verreries forestières du Pâturage de l'Envers et de Sous les Roches a été engagée. Elle est censée apporter des réponses aux questions suivantes :

1. Les creusets et les briques réfractaires du four de fusion sont-ils réalisés dans une matière première identique ?
2. Quelle est la provenance de cette matière première ?
3. Les creusets et les céramiques techniques non-réfractaires ont-ils été produits dans la verrerie ?
4. Peut-on définir la température de fonctionnement du four et sa distribution au sein de la structure ?
5. Les céramiques techniques et les fours révèlent-ils des traces d'altération dues à leur utilisation ? Si oui, quels sont les principaux agents d'altération ?

L'étude de ces deux verreries, exploitées successivement dans le vallon de Chaluët, met en évidence des corrélations entre les matières premières utilisées et leur mise en œuvre dans les fours et les céramiques techniques. Outre les liens géographique et temporel mentionnés, ces deux verreries furent en partie exploitées par les mêmes familles verrières, ce qui suggère une transmission des savoirs et des savoir-faire. Cette situation est à même de rendre perceptible les moindres changements, en particulier au niveau des outils de la production.

389 Dite aussi verrerie de Belle Côte.

390 Eramo 2005b.

391 Eramo 2005b ; Eramo 2006d ; Eramo 2006d.

392 Eramo 2006c.

393 Descœudres/Horat/Stöckli 1985, 29-36 ; Gerber 2003, 63-66 ; Eramo 2006c, 1.

394 Bélet-Gonda/Évéquoz/ Eramo 2007, 313-316.



## 5.5 Stratégie d'échantillonnage

### 5.5.1 Court, Pâturage de l'Envers

L'étude du matériel archéologique de Pâturage de l'Envers a été conduite en plusieurs étapes. Un premier échantillonnage sélectionné en janvier 2002 comprenait une grande variété de pièces : 20 tessons de céramique technique en terre cuite, 43 tessons de creuset, 95 fragments de four de fusion et 2 fragments de fours annexes. La sélection du mobilier s'est déroulée in situ et en laboratoire en tenant compte des structures archéologiques et de la stratigraphie. Une partie des prélèvements opérés sur le four de fusion ont été réalisés en 2002 dans la tranchée ouverte au moyen d'une découpeuse à disque (fig. 130 ; voir aussi chap. 6.1). En février 2010, une seconde série de 19 échantillons de pots à cuire a été sélectionnée pour les besoins d'une étude céramologique menée par Jonathan Frey, sur cette catégorie céramique particulière, pour tester des hypothèses archéologiques relatives à leur provenance et leur fonction dans la production du verre. Les critères de sélection retenus pour ces tessons étaient : la forme du récipient, l'aspect de sa surface extérieure et son positionnement hypothétique dans l'arche à cuire (fig. 131).

### 5.5.2 Court, Sous les Roches

A titre de comparaison, des échantillons de creusets provenant de la verrerie de Sous les Roches ont été sélectionnés au sein d'un important lot de matériel archéologique collecté par René Bassin, un chercheur amateur qui a opéré entre 1965 et 1979. En tout, 53 tessons de creusets ont été sélectionnés en fonction de différents critères : variabilité chromatique de la pâte, type de fragment (bord, paroi et fond de récipient) et épaisseur de paroi (fig. 175).



Fig. 130 : Court, Pâturage de l'Envers. Une tranchée à travers le four de fusion est ouverte au moyen d'une découpeuse à disque. Été 2002.

## 5.6 Matériaux

Christophe Gerber et Giacomo Eramo

Dans la mesure du possible, il est clair que les verriers privilégiaient la mise en œuvre de matériaux locaux dans la construction de leurs fours et la confection de leurs creusets, pour autant que ceux-ci soient disponibles et de qualité suffisante. La construction des structures communes des installations de production (halle et fours) incombait à l'ensemble des verriers-propriétaires ou à leurs amodiataires respectifs. Il est vraisemblable que les maîtres-verriers aient délégué l'un ou l'autre de leurs congénères pour choisir les terres et sables destinés à la construction des fours et à la fabrication des verres. Cette pratique est attestée quelques décennies plus tard par un projet de convention destiné à l'établissement d'Esserdilles, au bord du Doubs, qui stipule « qu'il sera aussi choisi 2 personnes pour la visite des sables, salins et autres matériaux nécessaires »<sup>395</sup>.

395 AAEB Procédures civiles Franches-Montagnes 15 juin 1759, fol. 3, pt. 2 ; Schwab (s.d), 48.

échantillon cont.		objet	matériau; type de fragment	couleur
DS1	75240-11, 75205-16, 75439-42	pot à recuire	terre cuite; bord	brun
DS2	77024-1612, 77001-26	pot à recuire	terre cuite; bord	zonée; cœur orange, surface ocre fumigée
DS3	75248-18	pot à recuire	terre cuite; fond	zonée; cœur orange, surface ocre vitrifiée
DS4	75228	pot à recuire	terre cuite; fond	zonée; cœur orange, surface ocre fumigée
DS5	77024-1388, 77024-1224, 77024-534	pot à recuire	terre cuite; fond	rouge-brun foncé
DS6	78151-359	pot à recuire	terre cuite; fond	brun
DS7	81332-691, 81332-670	pot à recuire	terre cuite; fond	brun
DS8	88121-105	pot à recuire	terre cuite; fond	brun
DS9	78230-149	pot à recuire	terre cuite; fond	orange
DS10	77024-1044, 77024-1163, 77024-261	pot à recuire	terre cuite; paroi	rouge-brun foncé
DS11	77024-607, 77024-452, 77024-98	pot à recuire	terre cuite; paroi	brun
DS12	77024-856, 77024-1046	pot à recuire	terre cuite; paroi	orange
DS13	81907-22	pot à recuire	terre cuite; paroi	zonée; cœur orange, surface ocre fumigée
DS14	77024-1318, 77024-173, 77024-295	pot à recuire	terre cuite; paroi	zonée; cœur orange, surface ocre fumigée
DS15	75237-165, 75237-104	pot à recuire	terre cuite; paroi	rouge-brun foncé
DS16	77024-78	pot à recuire	terre cuite; paroi	brun
DS17	77024-436, 77024-201	pot à recuire	terre cuite; paroi	orange
DS18	77024-1292, 77024-119, 77024-70	pot à recuire	terre cuite; paroi	zonée; cœur orange, surface ocre fumigée
DS19	77024-1145	pot à recuire	terre cuite; paroi	zonée, cœur orange; surfaces ocre
ER1	77527 P-1	pot à recuire	terre cuite; bord	surface jauneatre, cœur orange
ER2	75238 P-3	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER3	77527 P-4	pot à recuire	terre cuite; bord	ocre
ER4	77527 P-8	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER5	75237 P-3	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER6	77527 P-5	pot à recuire	terre cuite; bord	zonée; cœur orange, surface ocre fumigée
ER7	77527 P-3	pot à recuire	terre cuite; bord	zonée; cœur orange, surface ocre
ER8	75237 P-1	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER9	77527 P-3	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER10	75214 P-1	pot à recuire	terre cuite; bord	zonée; cœur orange, surface ocre
ER11	77527 P-2	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER12	75238 P-2	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER13	75238 P-1	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER14	75214 P-2	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER15	77575 P-7	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER16	77575 P-8	pot à recuire	terre cuite; bord	zonée; cœur orange, surface ocre
ER17	77575 P-3	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER18	77575 P-11	pot à recuire	terre cuite; bord	zonée; cœur orange, surface ocre fumigée
ER19	77575 P-6	pot à recuire	terre cuite; bord	orange
ER20	77575 P-1	pot à recuire	terre cuite; bord	orange, fumigée
ER21	n.n.	creuset	paroi	gris foncé
ER22	n.n.	creuset	paroi	gris clair
ER23	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER24	n.n.	creuset	paroi	gris clair
ER25	n.n.	creuset	paroi	violet
ER26	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER27	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER28	n.n.	creuset	paroi	gris
ER29	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER30	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER31	n.n.	creuset	paroi	gris
ER32	n.n.	creuset	paroi	gris
ER33	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER34	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER35	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER36	n.n.	creuset	paroi	gris clair
ER37	n.n.	creuset	paroi	gris clair
ER38	n.n.	creuset	paroi	jaune clair
ER39	n.n.	creuset	paroi	jaune clair
ER40	n.n.	creuset	paroi	jaune clair
ER41	n.n.	creuset	paroi	gris
ER42	n.n.	creuset	paroi	gris
ER43	n.n.	creuset	paroi	jaune clair
ER44	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER45	n.n.	creuset	paroi	jaune clair
ER46	n.n.	creuset	paroi	jaune clair
ER47	n.n.	creuset	paroi	gris clair

épaisseur (mm)	MO	XRD	PF	XRF	SEM	MT	objet	cont.	échantillon
11	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	75240-11, 75205-16, 75439-42	DS1
paroi 6; bord 12	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	77024-1612, 77001-26	DS2
paroi 8; fond 8	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	75248-18	DS3
paroi 9; fond 8	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	75228	DS4
paroi 6; fond 8	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	77024-1388, 77024-1224, 77024-534	DS5
10 à 13	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	78151-359	DS6
8 à 11	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	81332-691, 81332-670	DS7
paroi 7; fond 9-14	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	88121-105	DS8
paroi 7; fond 10	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	78230-149	DS9
9	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	77024-1044, 77024-1163, 77024-261	DS10
5	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	77024-607, 77024-452, 77024-98	DS11
5	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	77024-856, 77024-1046	DS12
8	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	81907-22	DS13
5	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	77024-1318, 77024-173, 77024-295	DS14
8	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	75237-165, 75237-104	DS15
11	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	77024-78	DS16
5	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	77024-436, 77024-201	DS17
5	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	77024-1292, 77024-119, 77024-70	DS18
6-7	X	X	X	X	—	X	pot à recuire	77024-1145	DS19
paroi 4; bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77527 P-1	ER1
paroi 5; bord 10	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	75238 P-3	ER2
paroi 5; bord 11	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77527 P-4	ER3
bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77527 P-8	ER4
bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	75237 P-3	ER5
bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77527 P-5	ER6
paroi 5; bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77527 P-3	ER7
paroi 3,5; bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	75237 P-1	ER8
bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77527 P-3	ER9
bord 11	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	75214 P-1	ER10
paroi 7; bord 13	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77527 P-2	ER11
bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	75238 P-2	ER12
paroi 6,5; bord 13	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	75238 P-1	ER13
paroi 6,5; bord 13	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	75214 P-2	ER14
bord 13	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77575 P-7	ER15
bord 13	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77575 P-8	ER16
bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77575 P-3	ER17
bord 13	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77575 P-11	ER18
bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77575 P-6	ER19
bord 12	X	X	X	X	—	—	pot à recuire	77575 P-1	ER20
27	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER21
27	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER22
25	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER23
22	X	X	X	X	X	—	creuset	n.n.	ER24
22	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER25
30	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER26
25	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER27
28	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER28
36	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER29
31	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER30
25	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER31
35	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER32
27	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER33
32	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER34
16	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER35
27	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER36
18	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER37
17	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER38
31	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER39
24	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER40
24	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER41
18	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER42
16	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER43
25	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER44
23	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER45
14	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER46
14	X	X	X	X	—	—	creuset	n.n.	ER47

échantillon cont.		objet	matériau; type de fragment	couleur
ER48	n.n.	creuset	paroi	gris clair
ER49	n.n.	creuset	paroi	jaune clair
ER50	n.n.	creuset	paroi	jaune clair
ER51	n.n.	creuset	paroi	gris
ER52	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER53	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER54	n.n.	creuset	paroi	gris foncé
ER55	n.n.	creuset	paroi	gris
ER56	n.n.	creuset	paroi	gris
ER57	n.n.	creuset	paroi	gris foncé
ER58	n.n.	creuset	paroi	jaune clair
ER59	n.n.	creuset	paroi	gris clair
ER60	n.n.	creuset	paroi	jaune
ER61	75212	creuset	paroi	gris
ER62	75212	creuset	paroi	jaune
ER63	75212	four de fusion	revêtement réfractaire (?)	–
ER64	75212	four de fusion	siège (?)	–
ER65	75238-1	creuset	paroi	gris
ER66	75238-1	four de fusion	siège (?)	–
ER67	75238-1	four de fusion	revêtement réfractaire (?)	–
ER68	75238-1	four de fusion	revêtement réfractaire (?)	–
ER69	75238-1	four de fusion	revêtement réfractaire (?)	–
ER70	75202/1	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (?)	–
ER71	75202/1	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (?)	–
ER72	75202/1	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (?)	–
ER73	75202/1	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (?)	–
ER74	75202/1	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (?)	–
ER75	75202/1	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (?)	–
ER76	75202/1	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (?)	–
ER77	75202/1	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (?)	–
ER78	75202/1	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (?)	–
ER79	75202/1	four de fusion	–	–
ER80	75218-1	four de fusion	liant structure externe (?)	–
ER81	75218-1	four de fusion	liant structure externe (?)	–
ER82	75206-49	four de fusion	liant structure externe (?)	–
ER83	75206-49	four de fusion	liant structure externe (?)	–
ER84	75206-49	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER85	75212	four de fusion	siège (?)	–
ER86	75212	four de fusion	siège (?)	–
ER87	75212	four de fusion	siège (?)	–
ER88	75212	four de fusion	siège (?)	–
ER89	75212	four de fusion	siège (?)	–
ER90	75212	four de fusion	siège (?)	–
ER91	75212	four de fusion	siège (?)	–
ER92	in situ	four de fusion	matériau de remplissage (N)	–
ER93	in situ	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER94	in situ	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER95	in situ	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER96	in situ	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER97	in situ	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER98	in situ	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER99	in situ	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER100	in situ	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER101	in situ	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER102	in situ	four de fusion	siège (N)	–
ER103	in situ	four de fusion	siège (N)	–
ER104	in situ	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (N)	–
ER105	in situ	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (N)	–
ER106	in situ	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (N)	–
ER107	in situ	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (N)	–
ER108	in situ	four de fusion	interface réfractaire / calcaire (N)	–
ER109	in situ	four de fusion	fond du canal de chauffe	–
ER110	in situ	four de fusion	fond du canal de chauffe	–
ER111	in situ	four de fusion	fond du canal de chauffe	–
ER142	in situ	four de fusion	sol (S)	–
ER143	in situ	four de fusion	structure interne (S)	–



épaisseur (mm)	MO	XRD	PF	XRF	SEM	MT	objet	cont.	échantillon
13	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER48
15	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER49
16	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER50
15	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER51
11	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER52
13	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER53
16	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER54
15	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER55
12	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER56
17	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER57
17	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER58
18	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER59
18	X	X	X	X	–	–	creuset	n.n.	ER60
18	X	X	X	X	–	–	creuset	75212	ER61
33	X	X	X	X	–	–	creuset	75212	ER62
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212	ER63
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212	ER64
25	X	X	X	X	–	–	creuset	75238-1	ER65
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75238-1	ER66
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75238-1	ER67
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75238-1	ER68
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75238-1	ER69
–	X	X(a)	X(a)	X(a)	–	–	four de fusion	75202/1	ER70
–	X	X(a,b)	X(a,b)	X(a,b)	–	–	four de fusion	75202/1	ER71
–	X	/	/	/	–	–	four de fusion	75202/1	ER72
–	X	X(a)	X(a)	X(a)	–	–	four de fusion	75202/1	ER73
–	X	X(a,c)	X(a,c)	X(a,c)	–	–	four de fusion	75202/1	ER74
–	X	X(b,d)	X(b,d)	X(b,d)	–	–	four de fusion	75202/1	ER75
–	X	X(b,c)	X(b,c)	X(b,c)	–	–	four de fusion	75202/1	ER76
–	X	X(b)	X(b)	X(b)	–	–	four de fusion	75202/1	ER77
–	X	X(a)	X(a)	X(a)	–	–	four de fusion	75202/1	ER78
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75202/1	ER79
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75218-1	ER80
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75218-1	ER81
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75206-49	ER82
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75206-49	ER83
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75206-49	ER84
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212	ER85
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212	ER86
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212	ER87
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212	ER88
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212	ER89
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212	ER90
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212	ER91
–	X	X	/	/	–	–	four de fusion	in situ	ER92
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER93
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER94
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER95
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER96
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER97
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER98
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER99
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER100
–	X	X(d,f)	X(d,f)	X(d,f)	X	–	four de fusion	in situ	ER101
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER102
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER103
–	X	X(a,d)	X(a,d)	X(a,d)	X	–	four de fusion	in situ	ER104
–	X	X(a)	X(a)	X(a)	X	–	four de fusion	in situ	ER105
–	X	X(a,b)	X(a,b)	X(a,b)	X	–	four de fusion	in situ	ER106
–	X	X(c,d)	X(c,d)	X(c,d)	–	–	four de fusion	in situ	ER107
–	X	X(c,e)	X(c,e)	X(c,e)	X	–	four de fusion	in situ	ER108
–	X	X(c)	X(c)	X(c)	X	–	four de fusion	in situ	ER109
–	X	X(c)	X(c)	X(c)	–	–	four de fusion	in situ	ER110
–	X	X(c)	X(c)	see box 516	–	–	four de fusion	in situ	ER111
–	–	X	X	see box 456	–	–	four de fusion	in situ	ER142
–	X	X	X	see box 456	–	–	four de fusion	in situ	ER143

échantillon cont.		objet	matériau; type de fragment	couleur
ER144	in situ	four de fusion	sol rougeâtre (S)	–
ER145	in situ	four de fusion	structure interne (S)	–
ER146	in situ	four de fusion	structure externe	–
ER147	in situ	four de fusion	liant structure externe (N)	–
ER148	in situ	four de fusion	terrain encaissant sous le four de fusion	–
ER149	in situ	four de fusion	sol rougeâtre (S)	–
ER150	in situ	four de fusion	structure interne (N)	–
ER151	in situ	four de fusion	sol (N)	–
ER267	in situ	four de fusion	siège (N)	–
ER268	in situ	four de fusion	interface réfractaire/calcaire (N)	–
ER269	in situ	four de fusion	interface réfractaire/calcaire (N)	–
ER270	in situ	four de fusion	interface réfractaire/calcaire (N)	–
ER271	in situ	four de fusion	interface réfractaire/calcaire (N)	–
ER272	in situ	four de fusion	liant structure interne (N)	–
ER273	in situ	four de fusion	liant structure interne (N)	–
ER274	in situ	four de fusion	liant structure interne (N)	–
ER275	75212-423	four de fusion	revêtement. réfract., proche de l'ouvrage (base)	–
ER276	75212-423	four de fusion	revêtement. réfract., proche de l'ouvrage (partie sup.)	–
ER277	75212-404	four de fusion	revêtement. réfract., intérieur du parement	–
ER278	75212-410	four de fusion	revêtement. réfract., intérieur du parement	–
ER279	70053	four de fusion	revêtement. réfract., proche de l'ouvrage (partie sup.)	–
ER280	75212-436	four de fusion	revêtement. réfract., voûte (centre ?)	–
ER281	75222-71	four de fusion	revêtement. réfract., siège (surface interne)	–
ER282	n.n.	four annexe	brique rouge	–
ER283	n.n.	four annexe	brique rouge	–

Fig. 131 : Court, Pâturage de l'Envers. Tableau récapitulatif des différents types d'analyses pratiquées sur les échantillons de fours, creusets et pots à cuire sélectionnés.

### 5.6.1 Pierre calcaire

Dans l'édification des fours du Pâturage de l'Envers, les verriers ont utilisé la pierre calcaire du site qu'ils ont tiré directement des flancs de la montagne de Montoz ou des pierriers ou éboulis de bas de pente accessibles en quelques minutes de marche. Quoique cette roche ait tendance à éclater au feu, son utilisation s'imposait pour des questions de commodité. Les pierres calcaires ont été mises en œuvre sans préparation particulière et liées au moyen d'une terre argileuse prélevée à même le site. Cette façon d'opérer explique le caractère peu régulier des maçonneries qui incluent sans complexe de gros blocs. Les pierres calcaires ont servi essentiellement à la réalisation de parements extérieurs et de fondations, par exemple sous le foyer du four de fusion.

### 5.6.2 Grès

Les quelques grès incorporés dans les maçonneries ou le blocage ont été probablement extraits à proximité même du site, peut-être dans les affleurements qui sont aujourd'hui encore

accessibles, par exemple à l'est de la verrerie<sup>396</sup>. Il ne semble pas y avoir d'utilisation spécifique de ces grès dans la construction de nos fours verriers. Par contre, les blocs retrouvés dans la démolition des habitations sont plutôt à rattacher à des foyers domestiques (fours ou fourneaux). La caractérisation et l'origine de ces roches devaient être précisées dans le cadre d'un projet d'analyses mis sur pied avec Jean-Pierre Berger du Département de Géosciences de l'Université de Fribourg. Sa disparition tragique mit en veilleuse le projet, si bien que les résultats n'étaient pas disponibles lors du dépôt du manuscrit du présent ouvrage.

### 5.6.3 Sable

La question du sable vitrifiable a été traitée plus haut (voir chap. 2.1.1). Il a pu, le cas échéant, être ajouté aux argiles pour la confection de briques ou de pâtons de réparation. La présence de sable a aussi été relevée dans la construction même du four de fusion, entre le corps du foyer central et la maçonnerie calcaire formant le parement extérieur. Cette observation a été réalisée à l'occasion du creu-

<sup>396</sup> Coordonnées nationales  
596 230/232 050.

épaisseur (mm)	MO	XRD	PF	XRF	SEM	MT	objet	cont.	échantillon
–	–	X	X	see box 456	–	–	four de fusion	in situ	ER144
–	X	X	X	see box 456	–	–	four de fusion	in situ	ER145
–	X	X(w+bl)	X	see box 456	–	–	four de fusion	in situ	ER146
–	X	X	X	see box 456	–	–	four de fusion	in situ	ER147
–	X	/	/	/	–	–	four de fusion	in situ	ER148
–	–	X	X	see box 456	–	–	four de fusion	in situ	ER149
–	X	X	X	see box 516	–	–	four de fusion	in situ	ER150
–	–	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER151
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER267
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER268
–	–	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER269
–	X	X	X	see box 456	X	–	four de fusion	in situ	ER270
–	X(a,b)	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER271
–	–	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER272
–	–	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER273
–	–	X	X	X	–	–	four de fusion	in situ	ER274
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212-423	ER275
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212-423	ER276
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212-404	ER277
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212-410	ER278
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	70053	ER279
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75212-436	ER280
–	X	X	X	X	–	–	four de fusion	75222-71	ER281
–	–	X	X	X	–	–	four annexe	n.n.	ER282
–	–	X	X	X	–	–	four annexe	n.n.	ER283

sement d'une tranchée transversale recoupant le socle de la chambre de fusion. Lors de la construction du four, les artisans ont volontairement laissé un espace de quelques centimètres entre les corps de maçonnerie définissant respectivement le parement intérieur et extérieur. Cet interstice fut comblé au moyen de sable sec durant l'édification même du four. Eramo a invoqué une justification technique, soit pour faciliter la réalisation ou la réparation des banquettes<sup>397</sup>. Cet intervalle est toutefois placé dans la maçonnerie, et non pas au contact entre le parement intérieur et la banquette. Nous émettons de notre côté l'hypothèse d'un espace permettant une certaine dilatation du four ou créant une zone-tampon. Cet interstice n'a dû exister qu'au niveau de la fondation du four et non pas se prolonger dans la voûte, qui se devait d'être exécutée de manière très solidaire.

#### 5.6.4 Argiles

Les rares documents d'archive en notre possession<sup>398</sup> permettent de préciser l'origine des sables et terres mis en œuvre sur le site et d'ap-

préhender de façon approximative les volumes convoyés. La question des sables ayant été abondamment traitée, intéressons-nous aux « gelben Erden », c'est-à-dire aux terres jaunes livrées de Sornetan. Elles font référence aux argiles réfractaires nécessaires à la réalisation des différentes qualités de briques de fours et des creusets. Si la région de Sornetan, appelée le Petit-Val, est connue pour ses affleurements argilo-sableux à caractère réfractaire exploités jusqu'au 20<sup>e</sup> siècle, nous ne savons pas si différents types d'argiles ont été transportés sur le site. Le document en notre possession n'indique aucune livraison de terre entre 1699/1700 et 1700/1701. Les premiers acheminements n'interviennent qu'entre 1701/02 et 1704/05, soit durant quatre années consécutives, et s'élèvent à 73 tonnes pour une somme de 5 livres et 10 sous. La première livraison fut la plus importante, avec 45 tonnes; elle coïncide sans doute avec l'installation du nouveau site de production et la construction des fours. Il apparaît donc que la verrerie du Pâturage de l'Envers n'est installée qu'environ deux ans après la requête officielle adressée au Prince. En admettant que

397 Eramo 2005a, 580, fig. 2 et 590.

398 Voir chap. 2.1.1.2, note 24.

échantillon	lithologie	formation géologique	niveau géologique	gisement	coordonnées	méthodes d'analyse				
						AG	MO	XRD	PF	XRF
ER112	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Envers de Montoz	596 850/232 300	X	X	X	X	X
ER113	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Envers de Montoz	596 850/232 300	X	X	X	X	X
ER114	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Envers de Montoz	596 850/232 300	X	X	X	X	X
ER116	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Chaluet	596 100/232 400	X	X	X	X	X
ER117	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Chaluet	596 100/232 400	X	X	X	X	X
ER118	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Chaluet	596 100/232 400	X	X	X	X	X
ER122	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Sur Sargé	594 700/232 000	X	–	X	X	X
ER125	sable de quartz	sidérolithique	Huppersande	Court, Sur Frête	591 510/231 200	X	X	X	X	X
ER126	argile sableuse	sidérolithique	Huppersande	Court, Sur Frête	591 510/231 200	X	X	X	X	X
ER127	sable argileux	sidérolithique	Huppersande	Court, Sur Frête	591 510/231 200	X	–	X	X	X
ER128	argilite	sidérolithique	Bolus	Court, Bergerie de Chavanné	531 800/232 650	X	–	X	X	X
ER129	argilite	sidérolithique	Bolus	Court, Bergerie de Chavanné	531 800/232 650	X	–	X	X	X
ER130	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Bergerie de Chavanné	531 800/232 650	X	X	X	X	X
ER131	sable de quartz	sidérolithique	Huppersande	Court, Mont-Girod / Lac Vert	591 075/233 150	X	–	X	X	X
ER132	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Pâturage de l'Envers	595 600/232 200	X	X	X	X	X
ER133	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Pâturage de l'Envers	595 600/232 200	X	X	X	X	X
ER134	argile	sidérolithique	Bolus	Court, Pâturage de l'Envers	595 600/232 200	X	X	X	X	X
ER136	argile	sidérolithique	Huppersande	Court, Mont-Girod / Lac Vert	591 075/233 150	X	X	X	X	X
ER137	argile	sidérolithique	Huppersande	Court, Mont-Girod / Lac Vert	591 075/233 150	X	X	X	X	X
ER138	argile	sidérolithique	Huppersande	Court, Mont-Girod / Lac Vert	591 075/233 150	X	–	X	X	X
ER139	argile	sidérolithique	Huppersande	Court, Mont-Girod / Lac Vert	591 075/233 150	X	–	X	X	X
ER140	argile	sidérolithique	Huppersande	Champez, Pâturage de Mont-Girod	590 300/233 625	X	–	X	X	X
ER141	argile	sidérolithique	Huppersande	Champez, Pâturage de Mont-Girod	590 300/233 625	X	–	X	X	X
ER248	sable argileux	sidérolithique	Huppersande	Saicourt, Forêt de Béroie	579 620/235 230	X	X	X	X	X
ER249	sable argileux	sidérolithique	Huppersande	Châtelat, Le Coteniat	581 370/235 510	X	X	X	X	X
ER250	sable argileux	sidérolithique	Huppersande	Châtelat, Le Coteniat	581 370/235 510	X	X	X	X	X
ER251	sable argileux	sidérolithique	Huppersande	Monible-Sous ce Mont	582 140/235 490	X	X	X	X	X
ER252	sable argileux	sidérolithique	Huppersande	Monible-Sous ce Mont	582 140/235 490	X	–	X	X	X
ER253	sable argileux	sidérolithique	Huppersande	Saicourt, Le Fuet	580 100/232 700	X	–	X	X	X
ER254	sable argileux	sidérolithique	Huppersande	Saicourt, Le Fuet	580 100/232 700	X	–	X	X	X
ER255	sable argileux	sidérolithique	Huppersande	Souboz, Montaigu	586 750/235 875	X	X	X	X	X
ER256	sable argileux	sidérolithique	Huppersande	Souboz, Montaigu	586 700/236 000	X	–	X	X	X

AG = analyse granulométrique ; MO = microscopie optique ; XRD = diffraction de rayons X ; PF = perte au feu ; XRF = fluorescence de rayons X

Fig. 132 : Tableau récapitulatif des échantillons de matières premières collectés et des types d'analyses pratiquées.

des tonneaux similaires à ceux ayant servi au convoyage du sable aient été utilisés pour le transport des terres argileuses, on peut estimer la quantité d'argile livrée sur le site à quelque 36 t. Cette valeur demeure très incertaine en raison de l'imprécision de l'unité en usage et du taux d'humidité du matériau excavé.

Les argiles réfractaires du Sidérolithique échantillonnées dans le Chaluet (fig. 132), à l'extrémité orientale de la vallée de Tavannes (fig. 133), ont une couleur blanchâtre à jaunâtre et une composition minéralogique et chimique très proche. Elles se composent majoritairement de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>399</sup>. Dans le corps céramique, les seules inclusions non-plastiques reconnaissables au microscope pétrographique sont le quartz monocristallin et plus rarement polycristallin, dont la granulométrie correspond à celle d'un sable fin (125-250 mm). La matrice argileuse déterminée par analyse XRD se compose de kaolinite, dont la

couleur tire parfois sur le brun en raison des oxydes et hydroxydes de fer présents.

Quelques échantillons de Court, Lac Vert, de Saicourt, Le Fuet et de Souboz, Montaigu comportent des fragments calcaires, tandis que l'échantillon de Saicourt, Forêt de Béroie contient en sus de petites quantités de feldspath, d'illite et de chlorite<sup>400</sup>. L'analyse granulométrique par tamisage de 21 échantillons de Hupper (sables argileux sidérolithiques), provenant de huit gisements situés à l'ouest de Court<sup>401</sup>, a révélé une texture sédimentaire assez fine. La majorité des particules ont une taille inférieure à 250  $\mu\text{m}$ . En outre, les échantillons provenant de Court, Lac Vert et de Souboz, Montaigu montrent une plus grande variabilité granulométrique au sein du même affleurement.

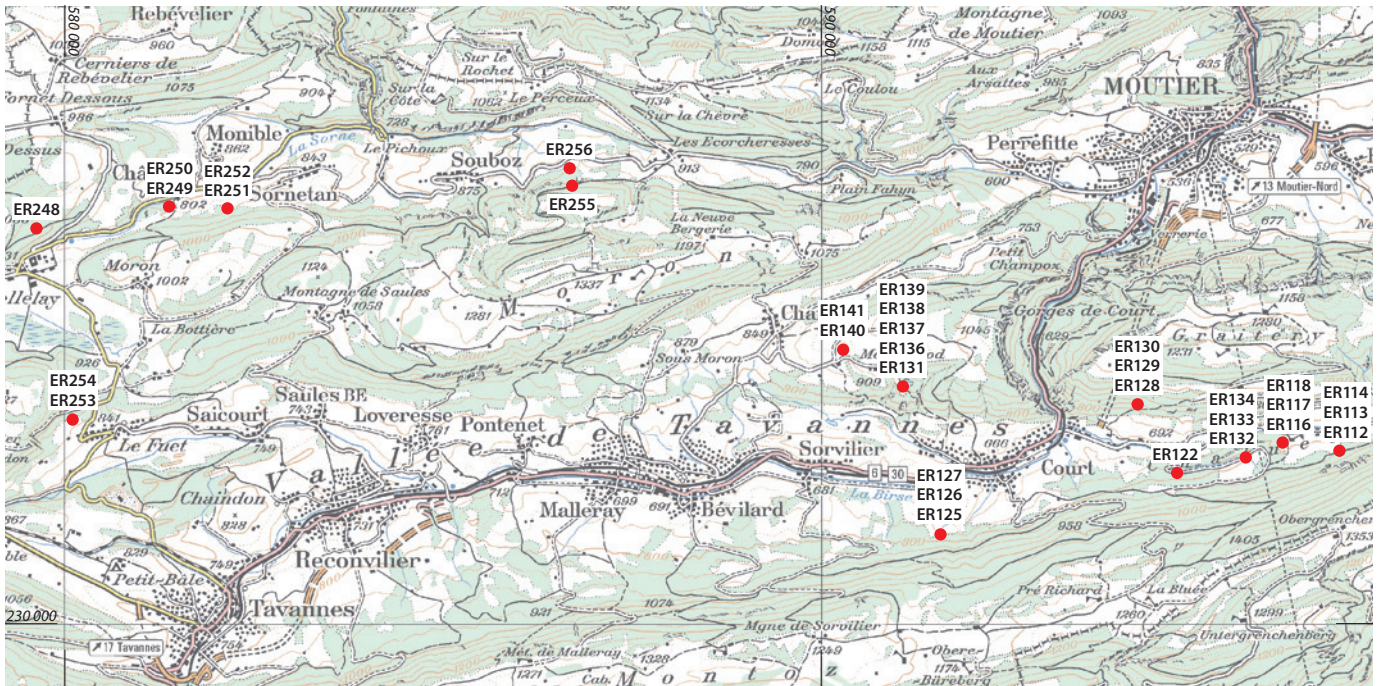
L'exploitation de la terre réfractaire et du sable de quartz vitrifiable dans le Jura bernois est attestée au moins dès le 17<sup>e</sup> siècle

399 Eramo 2006d, 190.

400 Eramo 2006d, 189.

401 Eramo 2006d, 188-189.





par les sources historiques (voir ci-dessus et chap. 2.1.1). Bien qu'il ne soit pas toujours possible de localiser précisément les anciens lieux d'extraction, on a pu montrer la variabilité des sédiments de Hupper pour la zone de Court, tant au niveau de la granulométrie que de la composition chimique.

D'après l'analyse statistique multivariée des composants principaux (fig. 134), appliquée à une sélection de variables chimiques et granulométriques<sup>402</sup>, on a constaté qu'il existe une forte homogénéité entre les matériaux réfractaires et les creusets des verreries de Court, Pâturage de l'Envers et de Court, Sous les Roches. Par ailleurs, les affleurements d'argile réfractaire de Court, Sur Frête et de Monible, Sous ce Mont<sup>403</sup> révélaient la meilleure relation avec les réfractaires susmentionnés. Comme le gisement de Petit Pré est le plus proche de la verrerie, à environ 5 km, il était raisonnable de le considérer comme la source de sable argileux la plus probable pour les deux verreries, surtout que la continuité entre les sites de Sous les Roches et de Pâturage de l'Envers est attestée d'un point de vue archivistique. Cette hypothèse, quoique séduisante, a été réfutée suite aux observations et données collectées sur place en 2011 (voir chap. 2.1.1). Le second site, quoique plus éloigné d'une dizaine de kilomètres, demeure envisageable et doit même être considéré comme le plus probable, puisque

des sources historiques attestent la livraison de terre réfractaire en provenance de Sorbetan, village qui jouxte Monible !

Sur le site du Pâturage de l'Envers, on note la présence d'un second groupe de briques, d'aspect plus commun et de couleur rouge-orange (voir chap. 5.7.2.1). Réalisées dans une terre argileuse dégraissée au moyen de sable et de débris divers, organiques ou non, celles-ci n'étaient pas destinées au four de fusion même, mais aux parties moins sollicitées d'un point de vue thermique (arches à recuire), ainsi qu'aux autres installations de chauffe. Les nombreux sondages mécaniques entrepris dans l'ensemble du périmètre de chantier ont révélé une grande variabilité pédologique : la présence d'argile fut attestée régulièrement, qu'elle soit de type bolus sidérolithique beige-jaune ou de type plastique gris sous nappes perchées. Les données archéométriques relatives aux briques sont présentées au chapitre 5.7.6.

Il semble que l'ensemble des matériaux utilisés par les verriers du Pâturage de l'Envers proviennent de la région proche : l'argile locale, le calcaire et le grès du site même, le sable vitrifiable et les terres réfractaires de Sorbetan, soit d'une distance maximale de 25 km. Le transport s'effectuait au moyen de chars en empruntant le réseau de routes et de chemins existants ; la verrerie se dressait au bord d'une voie locale qui reliait Court à Gänsbrunnen.

Fig. 133 : Localisation des gisements de sables et/ou de bolus échantillonnés. Ech. 1:100 000.

402 Eramo 2006d, 190-196.

403 Dénommé Monible, Côte dans les travaux d'Eramo.

			SiO <sub>2</sub> % pds	TiO <sub>2</sub> % pds	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % pds	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tot % pds	MnO % pds	MgO % pds	CaO % pds
Court, Pâturage de l'Envers	pot à recuire en terre cuite (n = 39)	moyenne	73.36	0.77	16.65	3.69	0.02	0.85	0.67
		dév. std.	4.87	0.09	2.37	1.50	0.01	0.36	0.16
	liant argileux four de fusion (n = 14)	moyenne	72.83	0.73	13.51	4.86	0.04	1.76	2.20
		dév. std.	3.23	0.06	1.43	1.01	0.02	0.37	1.24
	réfractaire four de fusion (n = 26)	moyenne	88.05	0.77	8.77	0.58	0.01	0.14	0.40
		dév. std.	1.49	0.22	1.22	0.24	< 0.01	0.10	0.19
Court, Sous les Roches	creusets (n = 43)	moyenne	90.08	0.81	8.89	0.43	0.02	0.12	0.21
		dév. std.	1.39	0.23	1.25	0.13	< 0.01	0.05	0.07
	creusets (n = 53)	moyenne	86.89	0.91	9.43	0.46	< 0.01	0.11	0.24
		dév. std.	2.42	0.23	2.08	0.22	n.d.	0.03	0.10
	matières premières locales Huppertsande (n = 19)	moyenne	86.76	0.59	8.11	0.97	0.04	0.22	0.44
		dév. std.	7.66	0.31	5.82	1.52	0.01	0.25	0.87
matières premières locales	Bolus (n = 13)	moyenne	69.50	1.12	16.87	7.25	0.02	0.56	1.85
		dév. std.	6.18	0.23	3.77	1.79	0.02	0.91	5.33

dév. std. = déviation standard ; n = nombre d'échantillons ; %pds = % en poids

Fig. 134 : Données chimiques moyennes obtenues par spectrométrie de fluorescence X (méthode XRF) sur les matériaux céramiques et les matières premières locales échantillonnées.

## 5.7 Éléments de construction du four

Laetitia Kaiser

### 5.7.1 Introduction à l'analyse

La catégorie des éléments de construction regroupe les briques, fragments d'ouvreaux et de voûte, tuilettes, tuiles, ainsi qu'un certain nombre de pièces diverses – petites plaquettes de terre cuite ou d'argile réfractaire, de même que différents éléments en terre cuite – employés dans l'édification du four de fusion.

#### 5.7.1.1 Etat de la recherche

En Suisse, les études archéologiques relatives aux éléments de construction demeurent encore peu nombreuses. Pendant longtemps, ces matériaux rarement récoltés en cours de fouille n'ont guère été considérés. Si quelques pièces richement décorées comme les carreaux et les briques – par exemple celles de Sankt-Urban<sup>404</sup> – ont suscité très tôt une attention particulière, c'est surtout le cadre architectural de l'emploi de ce type d'élément qui a jusqu'ici été investi, entre autres par Marcel Grandjean dans ses monographies<sup>405</sup>. La situation semble néanmoins avoir évolué ces dernières décennies avec la conscientisation de leur intérêt<sup>406</sup>, ce dont témoignent particulièrement les nom-

breux articles publiés depuis 1982 dans la revue *Bericht der Stiftung Ziegelei-Museum*. Des études à caractère typologique sur la tuile, les carreaux et la brique sont ainsi apparues, notamment grâce aux travaux de Michèle Grote et de Jürg Goll<sup>407</sup>.

Les éléments de construction spécifiques aux installations verrières sont généralement retrouvés en quantité à l'occasion des fouilles, mais ils font rarement l'objet d'études spécifiques. Nous devons à François Jannin la publication d'un fragment de sourcilier provenant du four de Pairu (FR), quoiqu'un cliché photographique ait déjà paru dans la monographie de référence *Phönix aus Sand und Asche. Glas des Mittelalters*<sup>408</sup>. Walter Lang a étudié de façon ponctuelle différents fragments d'ouvreaux dans sa publication consacrée à la verrerie du Nassachtal (DE)<sup>409</sup>, alors que Frommer et Kottman ont publié une soixantaine d'éléments de four, dont des sourciliers, issus de la verrerie de Glaswasen (DE)<sup>410</sup>. Dans son étude des ateliers de Reichenau (AT), Tarcsay a dénombré plus de 80 kg de matériaux constitutifs du four, parmi lesquels des fragments de pierre, de briques et de terres cuites diverses<sup>411</sup>. Leur étude apporte des informations essentielles sur la nature du four de fusion et précise aussi parfois son fonctionnement. Mais dans l'ensemble, l'étude détaillée des débris de fours verriers demeure un parent pauvre de l'archéologie verrière, alors même qu'elle serait capable de livrer des indices essentiels à la com-

404 Zemp 1898 ; Maurer 1999 ; Wolf 1999.

405 Voir notamment Grandjean 1989, 163-180 et Grandjean 1995, 89-136 pour les châteaux d'Estavayer FR et de Vuflens VD.

406 Chapelot/Chapelot/Rieth 2009 en est un bon exemple.

407 Voir, entre autres, Grote 1996, 7-64 ; Grote 1999, 113-124 ; Goll 1984, 29-102 ; Goll 2002, 9-28.

408 Baumgartner/Krueger 1988, 31, fig. 27 ; Jannin 1990, 267, fig. 3,9-10.

409 Lang 2001, 96 et 170-173, pl. 14-17.

410 Frommer/Kottmann 2004, 152-163, pl. 1-8 et cat. 30-35.

411 Tarcsay 2009, 76-83, fig. 57, 60.

Na <sub>2</sub> O % pds	K <sub>2</sub> O % pds	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> % pds	Ba ppm	Cr ppm	Cu ppm	Nb ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sr ppm	Y ppm	Zn ppm	Zr ppm	PF % pds
0.15	2.65	0.04	n.d.	n.d.	n.d.	13.41	n.d.	n.d.	169.02	68.39	17.03	n.d.	246.22	1.84
0.05	0.36	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	2.98	n.d.	n.d.	18.32	9.13	8.88	n.d.	37.34	0.71
2.42	0.71	0.09	293.43	246.07	451.57	12.36	148.79	32.71	126.71	77.79	15.21	80.71	205.36	1.74
0.46	0.35	0.03	42.27	23.48	1537.33	1.08	23.50	14.46	17.98	16.62	2.12	13.62	24.53	1.37
0.17	0.23	0.03	23.14	62.85	30.90	15.31	24.65	12.42	12.75	28.73	17.12	24.75	232.85	0.16
0.22	0.13	0.01	13.23	11.25	43.66	3.81	13.88	4.14	9.95	7.26	1.53	31.24	30.28	0.07
0.19	0.29	0.02	59.21	70.93	6.63	17.58	30.07	10.63	12.91	37.79	12.84	47.79	307.88	0.15
0.19	0.16	0.03	15.09	8.89	4.75	4.22	12.86	2.72	6.69	44.16	1.73	115.58	40.49	0.06
1.43	0.35	0.07	151.13	69.08	6.33	18.55	12.84	24.45	12.79	79.19	162.70	15.98	9.14	319.23
0.28	0.22	0.17	69.47	14.78	3.01	4.34	5.88	40.39	7.98	147.75	102.64	9.46	9.44	50.80
0.29	0.50	0.07	112.11	52.94	21.86	13.32	18.79	20.89	43.80	69.37	18.47	22.24	247.47	3.12
0.37	0.73	0.09	128.99	35.86	25.66	5.83	15.54	23.31	45.97	92.98	4.31	28.29	102.11	1.78
< 0.01	0.45	0.07	50.44	143.77	10.73	21.69	56.46	29.31	31.85	72.92	23.08	51.31	298.77	7.89
n.d.	0.57	0.03	52.34	36.64	6.56	4.57	26.56	6.93	28.11	74.92	8.18	24.52	65.22	2.86

préhension et à la reconstitution des structures de production. La récolte ciblée de certains ensembles de débris a permis de préciser, dans le cas du Pâturage de l'Envers, certains aspects du four de fusion.

### 5.7.1.2 Récolte sur le terrain

Les éléments de construction mis au jour au cours des diverses campagnes de fouille sont fortement éclatés. Si les grands fragments de voûte et d'ouvreaux, les tuiles et les tuilettes ont été, au vu de leur rareté, collectés de manière systématique, l'abondance des briques a au contraire occasionné une sélection. Les briques entières ainsi que celles présentant au moins une dimension complète (longueur, largeur ou épaisseur) ont été systématiquement prélevées. Pour le reste, le choix s'est fait de manière aléatoire et l'appréciation personnelle des fouilleurs a probablement joué un rôle dans la sélection des pièces. C'est dans la halle, à proximité des fours et dans les couches de démolition, que les fragments les plus représentatifs ont été ramassés. Dans le cas de petites structures, par exemple des trous de poteau, l'ensemble du matériel a été collecté, même s'il s'agissait de petits fragments. Dans les secteurs C (étenderie, habitations 2 et 3) et F, les briques étaient peu nombreuses; par conséquent, elles ont été systématiquement collectées. Dans l'habitation 1 (secteur D), elles étaient par contre abondantes. Elles ont

donc été pesées avant de subir un tri: seules les briques entières ou comportant au moins une dimension complète ont été conservées. Ce traitement spécifique s'explique par le caractère d'ensemble clos de l'habitation 1.

### 5.7.1.3 Sélection pour l'étude

Dans un premier temps, les briques, les tuiles et les autres éléments de construction en terre cuite ou en argile réfractaire collectés ont été dénombrés et pesés. Cette opération a été effectuée par contexte. Au total, 1082 briques entières ou fragmentaires ont été dénombrées, pour un poids total de 227 kg. A cela, il faut encore ajouter les parois de four, 466 pièces pour un poids total de 184 kg, ainsi que les 295 éléments en argile réfractaire indéterminés pesant 96 kg. Un choix a par la suite été effectué au sein des matériaux de construction conservés. Seules les briques, les tuiles ou les tuilettes entières, ou celles présentant au moins une dimension mesurable, ont été sélectionnées et individualisées. A cela, il faut encore ajouter les fragments d'ouvreaux et de voûte, ainsi que les autres éléments. Au final, 324 individus<sup>412</sup> ont été définis et catalogués, dont 215 briques, 3 fragments d'ouvreaux, 51 tuilettes, 11 fragments de voûte, 38 tuiles et 6 « éléments divers ».

Les briques demeurent le matériau le plus fréquent avec 67 % des individus. Les tuilettes et les tuiles représentent respectivement 15 % et

<sup>412</sup> Les numéros d'individus ont été attribués de 1 à n au travers de l'ensemble des catégories de matériel individualisées. Les doubles attributions ne sont pas possibles. Par ce biais, la recherche numérique et physique des pièces individualisées est garantie même après stockage final. Seuls les individus figurant dans le catalogue obtiennent un numéro de catalogue (cat.)



forme de brique	matériau	individus	pourcentage
parallélépipédique	terre cuite	82	38 %
claveau	terre cuite	56	26 %
indéterminée	terre cuite	26	12 %
parallélépipédique	réfractaire	32	15 %
indéterminée	réfractaire	19	9 %
total		215	100 %

Fig. 135 : Court, Pâturage de l'Envers. Dénombrement des briques collectées par formes et matériaux.

12 % des individus. Les pièces indéfinissables, les fragments d'ouvreaux et ceux de voûte se partagent les 6 % restants. En ce qui concerne les briques collectées, 76 % sont en terre cuite et 24 % en argile réfractaire (fig. 135). On dénombre 56 exemplaires complets, dont 33 rectangulaires et 26 claveaux en terre cuite, ce qui représente environ un tiers des briques individualisées. Aucune brique complète en argile réfractaire n'a été retrouvée. Au niveau de la répartition spatiale des briques sur le site, 48 % proviennent de la halle, 27 % du bâtiment 1, 14,5 % du four F49 et 7 % des zones de rejet. Les 3,5 % restants sont issus de l'étenderie et des bâtiments 2 et 3. La répartition des briques dans le secteur A, en particulier au sein de la halle, révèle quatre zones relativement riches : 4.4 (36 %), 9 (18 %), 4.2 (14 %) et 5 (12 %). Il n'est pas étonnant que ces zones aient livré la majeure partie des éléments. En effet, celles-ci se trouvent à proximité immédiate du four de fusion (4.2, 4.4 et 5) et des fours annexes (9). Les zones 1, 3, 4.1, 4.3, 6 et 11 n'ont de leur côté livré que 2 à 5 % des briques ; aucune brique n'a été collectée dans les zones 2 et 7 de ce même secteur.

#### 5.7.1.4 Caractéristiques générales des éléments

Les éléments de construction retenus se répartissent en différentes catégories. Il peut s'agir d'une brique parallélépipédique, en claveau ou de forme indéterminée, d'une tuilette, d'une tuile, d'un fragment de voûte ou d'ouvreau ou d'un élément entrant dans la catégorie « autres ». Deux matériaux ont été utilisés pour la fabrication des différents éléments de construction : une argile ferrugineuse et une argile réfractaire. Nous reviendrons plus

en détail sur ces deux matériaux dans les chapitres 5.7.2.1 et suivants. Trois types de dégraissant ont été mis en évidence : siliceux, micacé et micacé avec déchets de production verrière. Cependant, il arrive fréquemment que d'autres éléments fassent partie du dégraissant : grains de calcaire, pisolithe, grains ferrugineux, nodules de terre cuite ou traces d'éléments organiques. Dans le cas des briques parallélépipédiques, des tuiles, des tuilettes et des éléments indéfinissables, la longueur, la largeur (le grand côté de la section) ainsi que l'épaisseur (le petit côté de la section) ont été mesurés (fig. 136). Les dimensions sont prises avec l'élément reposant sur sa grande face. L'orientation de la brique au sein du four n'a aucune incidence sur les appellations de « largeur » et d'« épaisseur ». La position de la brique au sein du four peut effectivement être variable ; les traces de vitrification permettent de préciser la position de la pièce au sein de la construction.

En ce qui concerne les claveaux, une mise au point terminologique préalable nous semble nécessaire. Un claveau est constitué de six faces : deux à quatre faces obliques, une face inférieure (ou petite base) appelée *intrados* et une face supérieure (ou grande base) dénommée *extrados* (fig. 136). Celles s'appuyant sur les claveaux voisins sont appelées *lits*, les autres se nomment *têtes*. Pour les claveaux, les petits et les grands côtés de l'intrados et de l'extrados ainsi que la longueur orthogonale ont été mesurés. Pour les fragments de voûte et d'ouvreau, il n'était pas pertinent de prendre de mesure. L'observation attentive des pièces a révélé des traces de moulage, de façonnage, de mortier de montage, de rechapage ou encore la présence de surfaces scorifiées. De même, l'existence de négatifs laissés par des éléments végétaux (brindille, écorce, branche ou feuille), de traces de doigts, de petites stries ou de sillons plus profonds a été relevée.

#### 5.7.1.5 Conventions de mesure

Dès le début de l'étude, un certain nombre de cas problématiques – notamment lorsqu'il n'était pas possible d'orienter la brique – se sont présentés. Certaines conventions ont alors été établies afin de systématiser la prise des mesures. La première étape consiste à détermi-



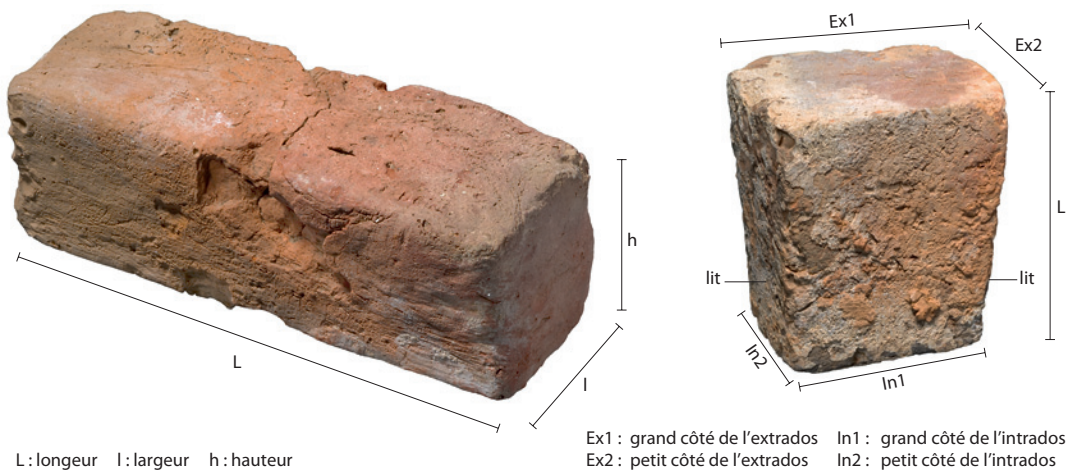


Fig. 136 : Court, Pâturage de l'Envers. Désignation des mesures types prises sur les briques parallélépipédiques (à gauche) et les claveaux (à droite).

ner s'il s'agit d'un claveau ou d'un parallélépipède. L'observation préalable suffit en général : des faces parallèles caractérisent une brique parallélépipédique, des faces divergentes, un claveau. Cette distinction est facilitée par le fait que les claveaux ressemblent souvent à des pyramides tronquées. Dans le cas d'un parallélépipède incomplet, il est parfois possible de déduire l'orientation de la brique. Dans la majeure partie des cas, cette déduction est impossible ; la valeur mesurée est alors attribuée par défaut à la largeur. Le même cas de figure se rencontre pour les claveaux : s'il n'est pas possible de trancher entre le petit ou le grand côté de l'intrados, la valeur est attribuée au grand côté (ce raisonnement est aussi valable pour l'extrados). Lorsque la distinction entre petite et grande base n'est pas possible, les valeurs sont attribuées par défaut à la petite base.

### 5.7.2 Briques

Quoique le présent volume soit dédié aux questions de production, il nous est paru logique de traiter des briques dans leur ensemble dans ce chapitre, en y incluant les individus provenant d'installations domestiques retrouvés en contexte d'habitat. Cela s'avérerait d'autant plus judicieux que l'interprétation de certains vestiges restait floue, comme dans le cas du four F49. Pour les fours verriers, deux sortes de briques ont été mises au jour : en terre cuite (164 individus) et en argile réfractaire (51 individus). Il convient, tout d'abord, de s'intéresser à la fabrication des briques, que l'*Encyclopédie* détaille avec précision. Deux techniques diffé-

rentes sont évoquées, selon qu'elles sont cuites ou crues<sup>413</sup>. Les briques cuites sont d'abord séchées au soleil, puis cuites et finalement utilisées dans la construction du four. L'utilisation de ces dernières dans la construction du four présente toutefois un problème majeur : le coulis, cette petite quantité d'argile diluée dans une grande quantité d'eau et utilisée comme mortier, ne supporte pas l'action du feu. Il se rétracte et laisse des espaces considérables au niveau des joints, qui peuvent nuire à la solidité de l'ouvrage.

Les briques crues, quant à elles, sont uniquement séchées au grand air. Les briques sont réalisées dans des moules en bois placés sur un fonceau. Dans son *Guide du verrier*, Bontemps nous rappelle qu'« on laisse ces briques sur leur fonceau tant qu'elles ne sont pas sèches pour être transportées ; puis, quand elles ont acquis un assez grand degré de siccité, on les range les unes sur les autres avec intervalles pour que l'air puisse circuler et achever la dessiccation »<sup>414</sup>. L'argile obtient ainsi la dureté et la consistance nécessaire pour être travaillée, tout en évitant les désagréments rencontrés avec les briques cuites. Les briques moulées réalisées dans différents modules facilitent l'édification de formes régulières. Le potier ou l'artisan chargé de la confection des briques choisira les terres en fonction des aptitudes recherchées. La réalisation du four de fusion capable d'atteindre des températures très élevées, supérieures à 1300° C, nécessite la mise en œuvre de briques résistantes. Aussi l'artisan choisit-il une terre grasse et sableuse, si possible riche en kaolinite (silicates d'aluminium).

413 Diderot/D'Alembert 1765c, 118-119.

414 Bontemps 1868, 146.



Fig. 137 : Court, Pâturage de l'Envers. Impuretés dans la pâte des briques : 1 déchet de verre, 2 empreinte de débris végétal et 3 pisolithe ferreux. Cat. 48, ind. 249 et 270. Ech. 1:2.



Fig. 138 : Court, Pâturage de l'Envers. Briques parallélépipédiques en terre cuite de petit (à gauche) et grand format (à droite). Cat. 33 et ind. 2060. Ech. 1:4.

Selon leur composition, elles offrent une résistance plus ou moins grande au feu, voire même une capacité isolante qui réduit la dispersion de la chaleur du centre du foyer vers l'extérieur. Une fois le four monté, la première étape consiste à allumer un feu à l'entrée de l'alandier. Un four verrier ne peut effectivement pas être employé sans être porté à sa température de fonction par paliers. L'exposer immédiatement à une forte chaleur est une opération très risquée ; certaines parties du four se fissureront inévitablement à cause du brutal retrait de l'humidité contenue dans les briques. Par conséquent, il faut attendre le four, c'est-à-dire procéder à une cuisson très progressive

jusqu'à obtenir une température élevée. Ensuite, le four est amené à sa température de travail par paliers successifs.

Les briques réfractaires retrouvées sur le site sont de couleur jaune-gris après cuisson ; la face en contact avec la chaleur intense de la fournaise se vitrifie en surface, effet peut-être facilité par la présence de cendres volatiles qui agissent comme un fondant. Si cette argile résistante aux hautes températures servait à la confection de briques, elle était aussi utilisée sous forme de mortier de montage pour assembler les briques entre elles. Sous sa forme pâteuse, elle servait encore à enduire la surface intérieure du four, à combler les fissures de rétraction et à rechapier les parois intérieures et extérieures lors des réfections périodiques, afin de garantir la bonne performance thermique des installations. Par ailleurs, les qualités spécifiques de cette argile sableuse s'avéraient idéales à la confection des creusets destinés à la fusion du verre.

#### 5.7.2.1 Briques en terre cuite (pl. 6-11)

Les verriers de Chaluët utilisaient une argile ferrugineuse pour réaliser leurs briques en terre cuite. Celles-ci sont de couleur rouge-orange ; quelques individus présentent toutefois une couleur rouge foncé. Le sous-sol jurassien est riche en argiles à pots, mais leur qualité reste inégale. Deux argiles de type différent ont été utilisées par les verriers. La première, fine, présente un dégraissant micacé, tandis que la seconde est grossièrement dégraissée avec des déchets vitreux (fig. 137,1). En tout, 70 individus présentent un dégraissant micacé et 93 contiennent un dégraissant micacé avec des déchets de production verrière. La présence de ces derniers démontre que les briques étaient fabriquées sur place, avec une argile locale épluchée de manière grossière. La présence fréquente de négatifs laissés par des éléments végétaux, brindille, écorce ou petite branche, étaye cette thèse (fig. 137,2). D'autres éléments ont également été retrouvés dans la matrice de certaines pièces : pisolithes (fig. 137,3), fragments de calcaire ou de gravier. La présence de grains de pisolithe renforce encore la thèse de l'argile locale ; en effet, à proximité de la première verrerie de Court, une terre argileuse renfermant des pisolithes a été découverte. La



présence de grains de pisolithe n'est guère surprenante vu l'existence d'affleurements sidérolithiques dans le Chaluet<sup>415</sup>. Les briques de terre cuite se présentent sous deux formes distinctes : le parallélépipède et le claveau. La section des premières est carrée ou presque carrée et conservée pour 67 individus. Leur étude a permis de dégager certains standards. On distingue deux modules : le premier est de 118 × 76 × 65 mm et le second, plus grand, de 185 × 105 × 89 mm<sup>416</sup> (fig. 138). En ce qui concerne les claveaux, on constate également une uniformité au niveau des dimensions. La longueur moyenne est de 116 mm. Les dimensions de l'intrados sont de 62 × 76 mm et celles de l'extrados de 82 × 87 mm (fig. 141).

Sept exemplaires<sup>417</sup> ne correspondent toutefois pas au canon établi (fig. 139). De section rectangulaire, ces briques sont très plates et leur hauteur varie entre 39 et 57 mm. Tandis que la plupart des individus présentent une couleur rouge-orange, celles-ci sont d'un rouge bordeaux sombre. Dans la matrice, on observe des taches noires. L'examen à la loupe binoculaire montre qu'il ne s'agit pas de déchets vitreux et qu'elles font corps avec l'argile. Il pourrait s'agir d'hématite qui, dans une atmosphère réductrice, serait devenue noire. Ces individus ont peut-être été produits ailleurs qu'au Chaluet. Des éléments similaires ont été découverts lors de fouilles dans l'abbaye de Saicourt, Bellelay<sup>418</sup>, située à une quinzaine de kilomètres de la verrerie (fig. 140). Il s'agit aussi de briques rectangulaires plates, de couleur rouge foncé, dont le dégraissant présente également des grains noirs qui ne font cependant pas corps avec la matrice.

Si la fabrication sur place des briques a pu être démontrée par l'argile utilisée, la présence de végétaux et surtout de déchets vitreux dans la matrice, de même que leur mise en œuvre, posent quelques interrogations. De manière générale, leur cuisson apparaît régulière et plutôt homogène avec une couleur de pâte qui tire de l'orange au brun-rouge ; les faces exposées directement à la chaleur présentent une cuisson secondaire qui vire au gris-noir. Ces briques étaient-elles montées crues ou cuites ? Difficile de trancher la question. Comme elles étaient destinées en priorité aux arches à recuire, aux fours annexes mais aussi aux fours domestiques, donc à des installations



Fig. 139 : Court, Pâturage de l'Envers. Brique parallélépipédique de grand format, à matrice rouge foncé. Cat. 38. Ech. 1:3.



Fig. 140 : Briques de deux formats différents provenant du site de l'ancien couvent de Saicourt, Bellelay. Sa matrice argileuse est similaire à celle de l'exemplaire de la fig. 140. Ech. 1:4.



Fig. 141 : Court, Pâturage de l'Envers. Claveau en terre cuite. Cat. 50. Ech. 1:3.

415 Pfirter et al. 1996.

416 Longueur/ largeur/ épaisseur.

417 Cat. 38, 39 et ind. 193, 260, 263, 273, 294. Pour la distinction ind./cat. voir la note 412.

418 Numéros d'inventaire de site 293.004.1999.01 et 293.01.2002.01.



Fig. 142 : Court, Pâturage de l'Envers. Brique réfractaire en forme de pain. Cat. 26. Ech. 1:3.



Fig. 143 : Court, Pâturage de l'Envers. Briques réfractaires de forme indéterminée. L'exemplaire de droite (cat. 25) présente une section conservée, au contraire de celui de gauche (cat. 28). Ech. 1:3.

atteignant des températures de fonctionnement moins élevées que le four de fusion, une cuisson préalable aurait pu garantir une meilleure stabilité et éviter de trop importants retraits. Par ailleurs, les briques de terre cuite ne révèlent pas de signes d'affaissement ou de déformation consécutifs à une mise en œuvre à l'état non cuit. Il est dès lors légitime de se demander dans quel four s'est déroulée leur cuisson. Au vu des volumes quand même réduits de matériel nécessaire, un petit four annexe aurait pu suffire. On pourrait même imaginer une cuisson dans une des arches de la verrerie de Sous les Roches, peu avant sa démolition et le transfert des activités au Pâturage de l'Envers.

### 5.7.2.2 Briques réfractaires (pl. 6-7)

Les briques réfractaires sont fabriquées à partir d'une argile sableuse de couleur blanche à beige d'origine sidérolithique. Il s'agit d'une argile siliceuse riche en alumine<sup>419</sup>. Les artisans de Chaluet ont utilisé une argile locale : plusieurs gisements sont identifiés dans la région

de Moutier, dans la vallée de Tavannes et autour de Bellelay (fig. 2). Cette argile sableuse naturelle est d'une telle qualité qu'elle peut être utilisée telle quelle. Toutefois, deux individus (ind. 242 et 245) présentent des déchets de production verrière dans leur pâte. Aucune brique entière en réfractaire n'a été mise au jour. La plupart des pièces étant mal conservées, il est difficile de restituer leur forme initiale. La majorité d'entre elles<sup>420</sup> présentent une forme de « pain » (fig. 142) aux angles arrondis, dont l'épaisseur varie entre 32 et 63 mm et la largeur entre 107 et 163 mm. Les autres exemplaires sont encore plus mal conservés (fig. 143). Par conséquent, il n'a pas été possible de dégager de module standard. En effet, seuls deux individus (ind. 164 et 165) présentent une section conservée : ils sont presque carrés (environ 78 × 54 mm).

### 5.7.2.3 Briques du four de fusion

Au sein des couches décapées dans le secteur du four de fusion, 78 exemplaires ont été collectés : 16 proviennent de la phase d'occupation du site et 62 des couches d'abandon.

### Phase d'occupation

Trois briques réfractaires et treize en terre cuite ont été mises au jour dans différents niveaux qui se rattachent à la phase d'exploitation du site. Quatre exemplaires<sup>421</sup> proviennent de deux niveaux de rejet (A19 et A126) principalement localisés hors de la halle. Ces quatre éléments sont en très mauvais état de conservation et comportent d'importantes traces de vitrification. Ces dernières sont le signe de la fusion d'un matériau, éventuellement du sable contenu dans le liant de la maçonnerie. On peut se demander pour quelles raisons des matériaux de construction ont été mis au jour dans la phase d'occupation ; on pourrait s'attendre en principe à en trouver surtout dans la phase d'abandon du site. Le four subit toutefois régulièrement des réparations, en principe une fois par année. Bontemps nous apprend que « ces réparations ne peuvent toutefois être faites qu'aux sièges ou aux murs d'ouvreaux. Quand la couronne est attaquée, il faut pourvoir au plus tôt au remplacement du four, ou au moins refaire une autre couronne. Les réparations à faire sur les plateaux sont assez faciles,

<sup>419</sup> Eramo 2005b, 8.

<sup>420</sup> Cat. 23, 24, 26, 27, ind. 154-156, 212-216, 223-225, 231, 233, 241, 248, 253, 256-258, 266 et 271.

<sup>421</sup> Ind. 238, 239, 241 et 242.



la terre préparée (semblable à de la composition de briques) se maintient assez bien dans les anfractuosités que le feu peut avoir déterminées. Les réparations aux murs de siège ne sont pas aussi faciles, et souvent, quelques heures après avoir mis des pastons dans les fentes, toute cette terre a été entraînée sur la grille; cependant, il en reste ordinairement suffisamment pour retarder la mise hors service de ces sièges et du four par conséquent »<sup>422</sup>. Il est possible d'imaginer que certains individus peu détériorés aient été réutilisés à d'autres fins, pour servir de supports ou de calage par exemple. Le fait qu'aucune pièce entière n'ait été mise au jour dans les niveaux d'exploitation appuie cette hypothèse. La technique de fouille pourrait également expliquer en partie cette situation. Lors de l'abandon du site, le four a été démonté et une partie des briques s'est retrouvée sur le sol. Elles ont peut-être été prélevée par les fouilleurs au cours du décapage, les couches n'étant pas toujours aisées à distinguer, mais il semble peu plausible que ce soit le cas pour l'ensemble des seize individus répertoriés.

#### Phase de démolition/abandon

On dénombre 62 individus associés à la phase de démolition du four de fusion, dont 33 en argile réfractaire<sup>423</sup> et 29 en terre cuite<sup>424</sup>. Cinq briques présentent un dégraissant vitreux et proviennent de différentes couches archéologiques; il n'est pas possible de restituer leur place au sein du four ou de déterminer leur fonction. Un individu de petites dimensions (ind. 196; 28 mm de côté) a également été mis au jour aux alentours du four de fusion. Il se peut que cet élément ait été utilisé pour caler deux briques, ou alors qu'il ait servi d'échantillon « test » pour appréhender la réaction de l'argile face à de hautes températures. Onze éléments proviennent des zones fouillées par André Rais<sup>425</sup> autour des fours. Il ne s'agit donc pas de trouvailles in situ, mais les niveaux recoupés se trouvant à proximité immédiate du four de fusion, il paraît légitime de rapporter ces exemplaires à ce dernier; d'autant plus que les individus mis au jour dans ces couches ressemblent en tout point aux autres briques découvertes sur le site.

La couche A5b est celle qui a livré le plus grand nombre d'individus, soit 31 dont 21 en argile réfractaire. Il s'agit d'une couche de démolition



Fig. 144 : Court, Pâturage de l'Envers. Brique en terre cuite avec traces de vitrification. Ind. 207. Ech. 1:3.

située au nord du four de fusion. Toutes les briques retrouvées sont fragmentaires, exception faite des individus complets ind. 207 et cat. 34. Leur état de conservation est mauvais; elles ont été soumises à une forte chaleur et présentent par conséquent des surfaces fortement scorifiées (fig. 144). Cette couche a également livré de nombreux éléments de voûte (voir chap. 5.7.4). Douze individus (sept en argile réfractaire et cinq en terre cuite) ont été mis au jour dans la couche A54; il s'agit d'une couche de démolition localisée entre les fondations de l'arche à recuire ouest et s'étendant pratiquement jusqu'à la paroi de la halle. Comme pour la couche A5b, la grande majorité des briques sont fragmentaires. L'exemplaire (ind. 222) échappe toutefois à la règle et révèle des surfaces scorifiées. La quinzaine d'exemplaires restants proviennent de différentes couches, situées de part et d'autre du four de fusion. Comme pour les autres niveaux, seules deux briques ont été retrouvées entières (cat. 33 et ind. 263); l'une d'entre elles présente une surface scorifiée et l'autre, fragmentaire, a pu être remontée.

#### 5.7.2.4 Briques des fours annexes

Les 24 individus mis au jour dans les couches associées aux fours annexes sont en terre cuite. La distinction entre la phase d'occupation et la phase de démolition n'a pas été jugée pertinente. En effet, la phase d'occupation n'a livré que deux individus, très fragmentaires. Avec quatorze individus, le four A164 a livré la majorité des individus provenant des deux fours. Ils ont été découverts dans la couche de démolition A175; celle-ci repose sur les fondations en « U » d'un petit four et comble encore

422 Bontemps 1868, 158.

423 22 parallélépipédiques et 11 de forme indéterminée.

424 2 claveaux, 15 parallélépipédiques et 12 de forme indéterminée.

425 Voir Gerber 2010, 34-36.

son canal de chauffe. Huit claveaux, deux parallélépipèdes et quatre de forme indéterminée ont été mis en évidence. Les briques sont dans un mauvais état ; la plupart sont fragmentaires et présentent des surfaces scorifiées. La forme en claveau de certaines d'entre elles suggère la présence d'une voûte, peut-être pour fermer le canal de chauffe. Quant aux éléments rectangulaires, ils parlent en faveur d'un laboratoire. Le four 211 n'a procuré que trois briques parallélépipédiques provenant de différentes couches de démolition. D'autres briques issues de couches non-attribuables à l'un ou à l'autre des fours ont été mises au jour. Comme pour la zone du four de fusion, les individus entiers demeurent rares (exception faite de cat. 35 et 36) et présentent de fortes dégradations dues à la chaleur. Les fours A164 et A211 ont vraisemblablement aussi été démontés lors de l'abandon de la verrerie en 1714.

#### 5.7.2.5 Briques des autres zones

##### *Zones de rejets (A10 et A13)*

Les zones A10 et A13 sont des zones ouvertes situées respectivement à l'est et au sud-est de la halle. Des couches de déblais rattachées à l'occupation du site y ont été mises au jour. Quinze individus proviennent de cette zone : douze sont en argile réfractaire et trois en terre cuite. Sans aucune surprise, les briques sont fortement endommagées ; la plupart présentent d'importantes traces de vitrification sur leur surface. La section de certaines est conservée. Ces zones de rejet se trouvant à proximité immédiate de la halle, il est vraisemblable que les exemplaires exhumés proviennent du four de fusion. Comme évoqué au chapitre 5.7.2.3, le four doit subir des réparations en moyenne une fois par année. Les briques endommagées sont alors rejetées sur les crassiers qui entourent la halle, en particulier à l'ouest et à l'est. Toutefois, comme mentionné précédemment, des briques ont aussi été mises au jour dans les couches d'occupation liées au four de fusion.

##### *Etenderie*

Dans le secteur C, un petit bâtiment abritant deux fours (C217 et C234) a été mis en évidence ; il s'agit d'un atelier à étendre le verre plat, aussi appelé étenderie. Quatre individus proviennent de cet aménagement, dont trois<sup>426</sup>

ont été retrouvés dans les couches de démolition du four C217 et un<sup>427</sup> dans celle du four C234. Ce dernier est une brique à dégraissant vitreux. Ces quatre éléments fragmentaires sont en terre cuite et présentent une couche gris-vert, due à la vitrification des particules sableuses en surface.

#### *Habitations 2, 3 et 4*

Durant la fouille, quatre bâtiments d'habitation ont été explorés et documentés. Hormis l'habitation 1, les bâtiments domestiques se sont révélés pauvres en matériaux de construction. L'habitation 4 n'a livré aucune brique, uniquement quelques fragments de tuiles disparates. L'habitation 2 a livré une bonne dizaine de fragments de briques, une tuile et des moellons de grès rougis par le feu qui pourraient appartenir à un four ou fourneau domestique. Quant à l'habitation 3, seuls deux individus, dont une brique à dégraissant vitreux, et trois fragments y ont été découverts. L'habitation 1 livre une impression de richesse atypique avec ses 57 briques individualisées.

#### *Habitation 1*

Quoique la problématique des céramiques de construction « domestiques » ne soit pas directement liée aux questions technologiques des fours verriers, elle est traitée en tant qu'élément de comparaison. On remarque, en effet, des similitudes entre les briques des fours verriers et celles de fours « domestiques » (pl. 9-11). Ces dernières étant bien conservées – la plupart sont entières – elles ont permis de se faire une idée plus précise de l'aspect initial des briques et de dégager des dimensions moyennes.

Lors de la fouille de l'habitation 1, les niveaux de démolition qui comblaient sa cave ont révélé une concentration tout à fait particulière de briques entassées pêle-mêle. Au vu des circonstances, les matériaux de construction ont fait l'objet d'un prélèvement systématique : toutes les pièces ont été pesées et les éléments les mieux préservés ont été conservés en vue de l'étude. Le poids total de l'ensemble avant tri atteignait 293 kg. Les individus conservés pesant en moyenne 850 g, on peut estimer qu'il s'agit d'une structure constituée d'au moins 345 briques et sans doute davantage, en considérant une récupération potentielle des matériaux par les verriers avant leur départ. Les

426 Ind. 293, 295 et 296.

427 Ind. 294.

57 individus recensés proviennent de la démolition d'un four. Une seule brique est en matériel réfractaire (fig. 145) ; cette dernière ne ressemble en rien aux autres éléments retrouvés sur le site. Il s'agit d'une brique plate de grande dimension (min. 200 × 150 mm, ép. 61 mm), à pâte fine et savonneuse de couleur saumon, dont la surface est rubéfiée. D'autres fragments d'argile réfractaire rubéfiée de nature similaire proviennent du même complexe archéologique et appartiennent manifestement au même type d'élément. En regard de la finesse de son grain, de sa rubéfaction superficielle et de sa planéité, nous émettons l'hypothèse qu'il puisse s'agir des restes d'une sole de four. L'état de conservation fragmentaire de ces éléments ne permet toutefois pas d'envisager leur taille initiale.

Les briques de terre cuite présentent un dégraissant micacé et se répartissent en deux groupes : 20 individus sont rectangulaires (fig. 146) et 32 sont en claveau. On dénombre en outre quatre fragments indéterminés. Au total, 36 pièces complètes ont été mises au jour. Une moitié des briques a été fabriquée à partir d'une argile fine contenant un dégraissant micacé, alors que l'autre a été réalisée dans une argile grossièrement dégraissée. La découverte de claveaux suggère la présence d'une voûte ; les briques rectangulaires constitueraient plutôt le corps du four, quoiqu'il soit tout à fait envisageable de réaliser une voûte avec des pièces parallélépipédiques. La quasi-totalité des individus (51 exemplaires) présentent sur une ou parfois plusieurs faces une croûte grise caractéristique de la fusion superficielle du matériau sableux. L'état d'altération de ces pièces pourrait à lui seul expliquer l'abandon sur place de ces éléments entiers. Cette constatation impliquerait le démantèlement complet du four lors de l'abandon du site et un tri sélectif des matériaux réutilisables. L'absence de couche organique dans le comblement de l'habitation 1, contrairement à ce qui a été observé pour les habitations 2 et 3, pourrait démontrer que ce bâtiment a aussi été dépouillé de ses pièces architecturales en bois.

En conclusion, les éléments en briques mis au jour dans cette habitation se rapportent à une installation domestique de cuisson (four) ou de chauffage (fourneau), dont il n'est pas possible de dresser le plan ni d'envisager ne serait-ce que la forme générale. Au vu du cor-



Fig. 145 : Court, Pâturage de l'Envers. Habitation 1. Brique de la sole du four domestique. Ind. 2011. Ech. 1:3.



Fig. 146 : Court, Pâturage de l'Envers. Habitation 1. Brique de four domestique. Cat. 40. Ech. 1:3.

pus matériel retrouvé dans le bâtiment, le lien avec le hameau verrier ne fait aucun doute et conforte l'interprétation d'une petite habitation abritant une famille verrière.

#### Four F49

Un second complexe singulier, découvert en contexte d'habitat, pose quelques difficultés d'interprétation : il s'agit du four F49. Ce dernier a livré 31 individus dont un en argile réfractaire. Les briques en terre cuite présentent un dégraissant micacé ; elles sont rectangulaires dans treize cas et en claveau pour douze individus. On recense encore cinq éléments indéterminés. Au total, quinze pièces entières y ont été mises au jour. Onze briques réalisées en terre cuite proviennent des couches F48a et F49b ; il s'agit de strates appartenant à la phase d'abandon de la structure. Vingt individus proviennent des couches d'humus F8a et F55 qui se sont développées sur le niveau de démolition du four. Un élément réfractaire et dix-neuf en terre cuite ont été mis au jour.



Fig. 147 : Court, Pâturage de l'Envers. Brique de petite dimension. Cat. 46. Ech. 1:3.



Fig. 148 : Court, Pâturage de l'Envers. Détail d'un négatif de feuille de hêtre à la surface de la brique ind. 176. Ech. 1:1.



La majorité des individus<sup>428</sup>, exception faite de quatre fragments, présentent des surfaces scorifiées, ce qui pourrait expliquer leur abandon. Une grande régularité se dégage au niveau des dimensions<sup>429</sup>. Cependant, quatre d'entre elles<sup>430</sup> (fig. 147) présentent des sections nettement plus petites que la norme : leur largeur oscille entre 49 et 59 mm et l'épaisseur entre 46 et 48 mm. Ces pièces ont dû être utilisées pour combler les interstices lors de la construction du four. L'utilisation de deux types de briques – en claveau et rectangulaire – dénote deux emplois distincts. Les premières ont servi à la construction d'un élément architectural en forme de voûte, alors que les secondes se rapportent au corps de maçonnerie.

La fonction de ce four demeure indéterminée. Sa structure ressemble à celle des autres petits fours du site, mais ses dimensions ainsi

que son mode de construction alliant briques et pierres diffèrent. Quant au mobilier archéologique, la vaisselle culinaire et domestique y est abondamment représentée. Quelques déchets de production de verre plat ont également été mis au jour<sup>431</sup>. Il pourrait s'agir d'une construction à usage domestique. L'éloignement du four par rapport à la halle ainsi que l'absence d'indices significatifs de production de verre semblent pouvoir étayer cette supposition.

### 5.7.2.6 Conclusion

En ce qui concerne les briques en terre cuite, la régularité de leurs dimensions et leurs formes parfaitement définies permettent d'affirmer qu'elles ont été moulées, puis lissées à la main. Après leur fabrication, elles étaient séchées au grand air à même le sol, dans un endroit abrité des intempéries. Preuve en sont les nombreux négatifs laissés par des éléments végétaux (paille, brindille, branchage ou feuille (fig. 148) ou les déchets de production verrière piégés en surface. Il semble que les éléments réfractaires aient également été moulés, mais les observations minutieuses de la surface n'ont pas permis de mettre en évidence des négatifs d'éléments organiques. Ce phénomène peut s'expliquer de deux manières : soit l'argile réfractaire n'est pas assez grasse pour que les débris s'y soient fixés, soit les briques ont été brossées après le séchage. Elles donnent l'impression d'avoir été fabriquées avec un plus grand soin que celles en terre cuite ; le bon fonctionnement du four en dépendait.

Les pièces en réfractaire et en terre cuite exhumées autour du four de fusion se rapportent tant aux phases d'occupation que d'abandon. Aucune aire de rejet spécifique à l'un ou l'autre type de briques n'a pu être mise en évidence. Toutefois, la couche de démolition située au nord du four de fusion a livré majoritairement des individus en argile réfractaire. De manière générale, l'état de conservation est mauvais. La constatation suivante s'impose : hormis cinq éléments fortement scorifiés, tous les individus sont fragmentaires. L'absence de briques entières pourrait s'expliquer par leur récupération par les verriers. Le four a été démonté lors de l'abandon du site et ses matériaux ont été soumis à un tri préalable ;

428 Ind. 274, 284, 288 et 2017.

429 Longueur : 95-144 mm, largeur : 70-82 mm et épaisseur : 58-69 mm.

430 Cat. 46 et ind. 289, 2012 et 2016.

431 Cont. 70166-70169.





Fig. 149 : Court, Pâturage de l'Envers. A gauche, détail d'une brique en terre cuite avec des traces de réfractaire (ind. 207) ; à droite, une pièce en réfractaire avec traces de terre cuite rouge (cat. 25). Ech. 1:2.

les briques en bon état auraient donc été récupérées, celles incomplètes ou trop dégradées par le feu abandonnées sur place. L'assortiment enchevêtré de briques rouges et réfractaires mis au jour est-il représentatif d'une réalité architecturale ou simplement lié aux hasards de la démolition ? Il semble vraisemblable que les briques en réfractaire trouvées dans cette zone proviennent du four de fusion dont les températures très élevées nécessitaient un matériau résistant. Reste toutefois à identifier la fonction des éléments en terre cuite.

L'hypothèse de leur emploi pour la construction des arches à recuire<sup>432</sup> est nuancée par deux individus : l'ind. 207 est en terre cuite et présente, sur un côté, des traces de matériau réfractaire, tandis que cat. 25 présente la situation inverse (fig. 149). Ces deux individus démontrent que des éléments en terre cuite et en réfractaire étaient utilisés côte à côte. Est-il possible qu'une brique rouge ait été utilisée pour la construction du four de fusion ? Au vu du piètre état de conservation de l'ind. 207 – qui semble avoir littéralement explosé sous l'effet de la chaleur – cette supposition semble plausible. Il est également possible d'imaginer que ces deux pièces se soient trouvées dans la zone de jonction entre le jour de fusion et les arches à recuire. Aucune brique réfractaire n'a été mise au jour dans la zone des fours annexes. Cette absence n'est toutefois pas significative : il se peut que des éléments en réfractaire aient été utilisés pour la construction de ces deux fours, mais récupérés avant l'abandon. La température de fonctionnement de ces four étant moins élevée (environ 900° C), il est envisageable que leurs laboratoires aient été réalisés uniquement en terre cuite.

### 5.7.3 Fragments d'ouvreaux et de tuilettes

La littérature archéologique fait rarement cas de ces éléments constitutifs du four car leur identification au sein des débris jonchant l'horizon de démolition demeure souvent difficile (voir chap. 5.6.1.2). En effet, leur état de conservation est souvent mauvais, puisque au moment de son arrêt, le four subit une contraction mécanique qui provoque la microfissuration de l'enveloppe. Lors du démantèlement et des chocs répétés, les parties vitrifiées éclatent en des milliers de débris. Une collecte systématique de ces débris permettrait, en théorie, de reconstituer l'aspect général du four. Dans la pratique cette opération n'a, à notre connaissance, jamais été réalisée et ce probablement en raison du travail fastidieux que nécessiterait le remontage des fragments.

#### 5.7.3.1 Ouvreaux

Les ouvreaux correspondent aux ouvertures percées dans la moitié inférieure de la voûte du four, qui permettent aux verriers d'accéder au verre contenu dans les creusets. Ils se présentent sous la forme d'un canal qui s'élargit en forme de cône vers l'intérieur du four. À l'extérieur, l'ouverture, qui ici n'est jamais conservée, se présente sous la forme d'une petite fenêtre dont la partie supérieure est voûtée. C'est par ces ouvertures de taille réduite que le verrier cueille la paraison au moyen d'une canne à souffler. Les ouvreaux contribuent aussi à la circulation de l'air dans le four et sont une source de déperdition de chaleur, que le verrier atténue au moyen d'une plaque d'argile grossière,

432 Voir Gerber 2010, 49.



Fig. 150 : Court, Pâturage de l'Envers. Grand fragment remonté provenant de l'intérieur du four de fusion. On y remarque les vestiges de trois ouvreaux de forme circulaire. Le bloc mesure 62 x 54 cm. Ind. 2169. Ech. 1:6.

la tuilette. Le nombre d'ouvreaux correspond à celui des creusets et détermine le nombre de places de travail.

A l'époque postmédiévale, selon la taille de la manufacture et le type de production, un four de fusion compte entre huit et douze ouvreaux ; les fours dits à ailettes, comme celui du Pâturage de l'Envers, en comptaient entre dix et douze. D'après l'acte d'amodiation, notre four comportait dix ouvreaux qui correspondaient à autant de places de travail. Au cours du démantèlement, les coups portés à la structure font voler en éclats le corps vitrifié. L'archéologue est donc confronté à un gigantesque puzzle qui n'en vaut pas toujours la chandelle. Dans notre cas, la concentration de gros fragments a facilité ce travail de remontage, si bien que trois blocs d'ouvreaux peuvent être présentés.

#### Ind. 2169

Cet individu, le mieux conservé de tous, provient de la couche de démolition A5b qui flanquait le côté nord du four de fusion. Il s'agit d'un bloc (fig. 150) qui faisait partie de l'une des parois latérales du four. Ses dimensions hors tout atteignent environ 60 x 52 x 29 cm<sup>433</sup>. On y aperçoit trois ouvreaux fragmentaires

qui, dans leur section longitudinale, offrent une forme tronconique s'élargissant de l'extérieur vers l'intérieur du four. Les piliers des ouvreaux présentent une section triangulaire : ils sont épais à la base et se resserrent pour former une arête, dont l'orientation devait être plus ou moins verticale dans le four. La surface est vitrifiée, crevassée et de couleur verte. À mesure que l'on s'éloigne de l'arête, la vitrification s'éclaircit et la surface devient plus lisse et plus opaque avec l'apparition d'une croûte blanchâtre mate similaire à celle observée sur le bord des creusets (voir chap. 5.8.2.3). Quatre recharges successives d'argile correspondant à autant de réparations sont visibles ; toutes présentent une surface vitrifiée. Côté intérieur du four, l'ouveau le mieux conservé mesure environ 25 cm de large pour au moins 27-28 cm de hauteur ; du côté extérieur, la section se réduit pour atteindre environ 18 cm de largeur pour une hauteur estimée à 18 cm au moins (cont. 75212).

#### Ind. 2171

Cet élément de 31 x 39 cm (fig. 151) a également été mis au jour dans la couche de démolition A5 (voir ind. 2169). Il provient de l'une des parois latérales : on aperçoit un pilier et deux ouvreaux fragmentaires. L'arête et les parois des ouvreaux révèlent une vitrification verte. Le fond des ouvreaux est recouvert d'une croûte blanchâtre mate similaire à celle observée sur la partie intérieure du creuset qui était orientée vers l'ouveau. Ces vestiges vitrifiés se trouvaient à l'intérieur du four, aucun élément de la face extérieure n'est conservé. On constate également que le fond des ouvreaux présente une légère pente qui permet au verrier de voir le contenu de son creuset. La base du pilier est épaisse et elle s'affine à mesure que l'on s'approche de l'arête. La paroi extérieure n'est pas conservée ; son épaisseur originelle, soit celle de la base de la voûte, atteignait plus de 30 cm. Le corps de la pièce est formé d'un conglomérat d'argile réfractaire dans lequel il n'est pas possible de distinguer de brique. Côté intérieur, l'ouveau avait une hauteur d'au moins 22 cm ; côté extérieur, il mesurait quelque 15 cm de largeur pour un minimum de 14 cm de hauteur. A l'image d'ind. 2169, l'épaisseur de la maçonnerie atteignait plus de 30 cm à ce niveau (cont. 75212).

433 Longueur/ profondeur/ hauteur.

**Ind. 2170**

Cet individu a été mis au jour dans la couche de démolition A54 qui comblait l'aire de tissage ouest et s'étendait pratiquement jusqu'à la paroi de la halle. Il s'agit d'une pièce massive (fig. 152) en forme de croissant, difficile à orienter. Ses dimensions hors tout sont de  $44 \times 26 \times 15$  cm. Le piédroit, soit la surface verticale du mur soutenant la voûte, et l'arcade dévoilent une vitrification vert pâle et crème. Les parois intérieures, latérales et biaises qui s'évasent de l'extérieur vers l'intérieur sont également entièrement vitrifiées : vert-beige mou-cheté de bleu et de blanc. La partie supérieure de la pièce présente quatre couches successives de rechapage atteignant respectivement 23, 21, 52 et 39 mm. Le côté interne montre de nombreuses fissures vitrifiées. Parmi l'enchevêtrement de matière réfractaire, on distingue une brique ; elle n'est pas complète, mais sa forme se dessine clairement. Seule son épaisseur est conservée : 66 mm. Une interrogation subsiste quant à l'orientation et à l'emplacement de cet élément dans le four ; il pourrait s'agir de la partie supérieure d'un ouvreau (sourcilier) ou d'une des portes du foyer-canal. L'aspect massif de la pièce parle plutôt en faveur de cette seconde hypothèse. Les dimensions de l'ouverture sont impossibles à estimer (cont. 77053).

**5.7.3.2 Tuilettes**

Les tuilettes sont des plaques en argile réfractaire utilisées pour obturer les ouvreaux afin de réduire la déperdition de chaleur durant la fusion. La partie inférieure de la tuilette est horizontale, les côtés légèrement évasés ou verticaux, et la partie supérieure arrondie. La pièce est percée en son centre d'un trou de préhension (fig. 153-154) qui permettait au verrier de la manipuler au moyen d'un crochet métallique. Sur le site du Pâturage de l'Envers, 50 fragments de tuilettes ont été mis au jour (pl. 11-12) ; il n'a toutefois pas été possible d'en restituer un exemplaire complet. Ces pièces ont été réalisées à partir d'une argile sableuse similaire à celle utilisée pour les briques réfractaires, généralement dégraissée de manière grossière à l'aide de chamotte, de déchets de production verrière, de calcaire et de grains ferrugineux. À l'exception du cat. 56 (fig. 154) réalisé dans une argile réfractaire fine, les tuilettes



Fig. 151 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragment d'ouvreaux. Dimensions  $39 \times 31$  cm. Ind. 2171. Ech. 1:6.

Fig. 152 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragment d'ouvreau ou d'alandier. Hauteur : 44 cm. Ind. 2170. Ech. 1:6.

donnent l'impression d'avoir été fabriquées rapidement, sans soin particulier. Leur épaisseur varie entre 13 et 28 mm. Dans 68 % des cas, une partie du bord est conservée. Seuls deux exemplaires (cat. 54 et ind. 2123) sont en mesure de donner une indication quant à la largeur des tuilettes : elle était de 110 mm au minimum (fig. 155). Le trou de préhension, dont le diamètre varie entre 10 et 15 mm, est perceptible sur dix pièces, mais aucun n'est entier.

À l'exception du cat. 56, les tuilettes présentent deux faces d'aspect distinct : l'une est couverte d'une vitrification de couleur crème, verte, noire ou turquoise, l'autre apparaît vacuolée et de couleur brun-beige. La face vitrifiée était en contact avec la chaleur directe du four. La moitié des exemplaires présentent une croûte blanchâtre mate provoquée par la fusion d'un matériau sableux. La répartition spatiale des tuilettes est claire : 43 individus,



Fig. 153 : Lakenborn im Sol-  
ling (DE), verrerie exploi-  
tée entre 1655/56 et 1681/82.  
Exemple d'une tuilette d'ou-  
vreau complète: à gauche  
sa face intérieure vitrifiée,  
à droite sa face extérieure.  
Clichés aimablement mis à  
disposition par Radoslaw  
Myszka. Ech. 1:3.



Fig. 154 : Court, Pâturage de  
l'Envers. Deux fragments de  
tuilette ou de plaque d'ob-  
turation appartenant pro-  
bablement à la même pièce.  
Trou de préhension polygo-  
nal partiellement conservé.  
Cat. 56. Ech. 1:3.



Fig. 155 : Court, Pâturage  
de l'Envers. Fragments de  
tuilettes vitrifiées. Cat. 53-55.  
Ech. 1:3.



soit la majorité des fragments, proviennent de la halle, quatre ont été mis au jour dans la zone de rejet A13 et trois ont été découverts dans la zone C, près de l'étenderie et de l'habitation 2 (fig. 156). Dans la halle, les différentes couches d'occupation ont livré plus de fragments de tuilettes que les strates associées à l'abandon du site. Ce phénomène s'explique probablement par la durée de vie limitée des tuilettes, puisqu'elles étaient exposées à de fortes variations de températures et fréquemment manipulées.

Les tuilettes retrouvées en contexte archéologique sont rares ou n'ont guère été étudiées jusqu'à présent. Parmi les exemplaires publiés récemment, mentionnons celles de l'atelier de Pairu ou Pérup (FR), de Lakenborn im Sol-  
ling (DE) et de Bauernberg in Liebenau (AT). Les deux premières atteignent respectivement 10 × 14 cm et 17 × 22 cm, la dernière est incomplète<sup>434</sup>.

#### 5.7.4 Fragments de voûte

Plusieurs éléments se rapportant à la voûte du four ont été mis au jour. Les fragments n'ont toutefois pas été collectés de manière systématique, puisque seuls ceux de dimensions représentatives, d'une surface de plusieurs dm<sup>2</sup> et pouvant éventuellement livrer des indications quant à la forme de la voûte, ont été prélevés. Les pièces étudiées proviennent toutes de la couche de démolition A5b qui flanquait le côté nord du four de fusion. Comme ces frag-

<sup>434</sup> Jannin 1990, 267,  
fig. 3,10; Stephan 2008,  
126; Leiber 2008, 145.



ments sont fragiles et peu photogéniques, seul un exemplaire (fig. 157) présentant des rechapages successifs typiques (réparations) sert à illustrer cette catégorie. De manière générale, leur apparence coïncide en tous points avec les ouvreaux décrits précédemment.

#### Ind. 2172 (fig. 157)

Cet élément provient de la voûte du four ; il s'agit d'une pièce légèrement concave présentant trois couches de rechapage de respectivement 15, 22 et 31 mm d'épaisseur. La surface montre quelques aspérités et une vitrification verte et crème mouchetée de bleu par endroits. À une extrémité, on distingue peut-être l'amorce d'une courbure qui annoncerait la partie supérieure d'un ouvreau. Sa longueur et sa largeur hors tout sont respectivement de 69 et 39 cm.

#### Ind. 2173

Cet élément de paroi présente une vitrification verte sur toute sa surface. Deux coulures turquoise et rose permettent d'orienter la pièce au sein du four. On distingue clairement les briques, dont aucune dimension n'est toutefois conservée, et les couches de rechapage. Celles-ci sont très fines : leur épaisseur varie de 10 à 12 mm. La couche de rechapage supérieure est décollée du reste de la pièce ; il est probable que la couche précédente ait été mal solidarisée et se soit détachée. Les dimensions hors tout de cet élément sont de 24 × 27 × 10 cm<sup>435</sup>.

#### Ind. 2174-2182

Ces neuf petits éléments semblent provenir de la voûte. Ils sont recouverts d'une couche vitrifiée verte ou crème et certains présentent des couches de rechapage dont l'épaisseur varie entre 11 et 19 mm. Chez les ind. 2178-2179 et 2181, on distingue de la brique piégée dans la masse de réfractaire. L'épaisseur de ces pièces varie entre 51 et 56 mm ; elles correspondent donc parfaitement aux standards mis en évidence pour les briques réfractaires (voir chap. 5.7.2.2). Ces individus ne livrent pas d'informations supplémentaires.

Tuilettes

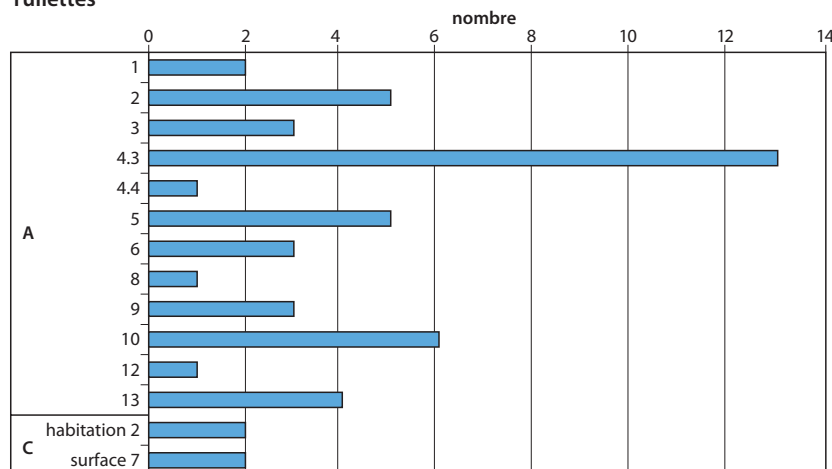


Fig. 156 : Court, Pâturage de l'Envers. Répartition des fragments de tuilettes sur le site.

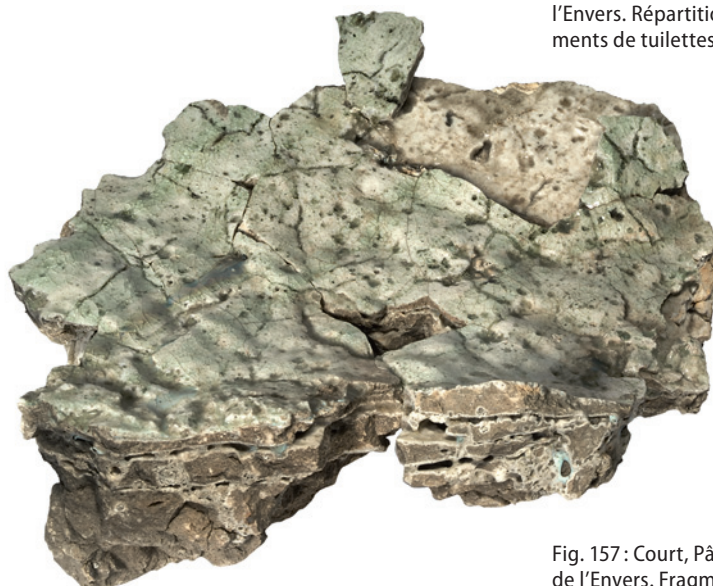


Fig. 157 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragment de la voûte du four de fusion. Les rechapages successifs sont bien visibles. Ind. 2172. Ech. 1:3.



Fig. 158 : Court, Pâturage de l'Envers. Divers éléments de terre cuite et de réfractaire. Cat. 32, 37 et 61. Ech. 1:3.

### 5.7.5 Éléments divers

Trois fragments de terre cuite (fig. 158), de forme initiale indéterminée, ont été retrouvés dans la halle, dans un niveau de rejets de production ainsi que dans une couche de démolition de l'étenderie. Les trois individus présentent des sillons dont la profondeur peut atteindre 10 mm. Il s'agit probablement d'un

<sup>435</sup> Longueur/largeur/épaisseur.

négalif de clayonnage. Deux petites plaquettes (cat. 32 et ind. 2116) en argile réfractaire ont également été découvertes dans la halle ; elles ont été interprétées comme des pains de liant servant à sceller les briques entre elles. Une mystérieuse plaquette en terre cuite (cat. 37) de couleur brune a été retrouvée dans la zone de rejet A13. Sa surface présente des stries entrecroisées, mais sa fonction n'a pas pu être déterminée. Enfin, 38 fragments de tuiles appartenant à autant d'exemplaires ont été mis au jour au cours de la fouille. Cette quantité peu significative montre à l'évidence que ces éléments n'étaient pas utilisés en toiture, mais en remploi sur le site. Ils pouvaient être intégrés, par exemple, à la construction de petits fourneaux afin de combler des interstices.

### 5.7.6 Données archéométriques

Giacomo Eramo

Parmi les fragments de réfractaire retrouvés dans la zone centrale du four, six échantillons de revêtement interne de la chambre de fusion ont été sélectionnés, parmi lesquels trois fragments d'ouvreaux (fig. 150-152) et un morceau de brique réfractaire provenant de la banquette. Le revêtement réfractaire présente une surface vitrifiée sur environ un millimètre d'épaisseur, dont l'origine est à rechercher dans le contact de la paroi avec les alkalis présents dans les gaz de combustion<sup>436</sup>. La brique réfractaire montre quant à elle plutôt une corrosion due au contact avec du verre fondu. L'analyse chimique (XRF) de ces matériaux a mis en évidence une composition très similaire qui se caractérise par une concentration d'au moins 95 % (poids) de SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ces caractéristiques compositionnelles s'accordent avec celles rencontrées dans les pâtes de creusets (fig. 134). Elles démontrent l'utilisation d'une argile sableuse identique pour les deux catégories de matériaux<sup>437</sup>. La composition minéralogique déterminée par XRD coïncide aussi pour ces échantillons qui comprennent, par ordre de quantité décroissante, les minéraux suivants : cristobalite, quartz, tridymite et mullite<sup>438</sup>. La formation, dans les réfractaires de la chambre de fusion et dans les creusets, de phases cris-

tallines de haute température, comme la cristobalite, la tridymite et la mullite, permettent de situer les températures de travail atteintes par le four de fusion du Pâturage de l'Envers, entre 1330 et 1500° C<sup>439</sup>.

## 5.8 Creusets

Laetitia Kaiser

### 5.8.1 Introduction à l'analyse

On appelle creusets les pots placés dans le four de fusion pour faire fondre le verre. Ils faisaient partie de l'équipement personnel du verrier, tout comme les pots à recuire et l'outillage nécessaires à la production de verre. Ils sont fabriqués dans une argile réfractaire capable de résister, à l'instar du four de fusion avec lequel ils font corps, à des températures très élevées. La qualité de la matière première est importante car elle détermine la résistance des pots au feu et à la fusion. Mais, le façonnage l'est tout autant : les moindres microfissures pouvant provoquer la perte du récipient et signifier du même coup la suspension momentanée de la production, le temps de remédier au problème.

Mais au contraire des briques du four qui forment une masse unie, les creusets sont des récipients dont les parties sont exposées à des températures différenciées : réfraction de la chaleur par la voûte et chaleur de contact au niveau du fond posé sur une banquette. A cela s'ajoute une épaisseur de paroi qui varie du bord au fond, le fond étant souvent très épais. Le contenu même du creuset voit sa température augmenter au fil du processus de fusion, mais aussi au gré des cueillées et de l'abaissement du niveau de verre en fusion. L'addition de ces paramètres couplée à la variabilité des températures au cours du processus de production créent un stress mécanique qui fragilise le creuset au fil du temps. Aussi le plus grand soin devait être donné à la confection de ce récipient. A qui revenait-elle ? Au verrier, à un membre de sa famille ou était-elle déléguée à un potier spécialisé ? La question est légitime, mais la réponse pas facile à apporter. A défaut de document spécifique à notre

<sup>436</sup> Eramo 2005a, 578.

<sup>437</sup> Eramo 2006d, 192-196.

<sup>438</sup> Eramo 2005a, 576.

<sup>439</sup> Eramo 2005a, 586 ; Eramo 2006a, 445.

verrerie, il nous semble intéressant de relier quelques remarques glanées çà et là dans diverses sources. Guy-Jean Michel a montré qu'au début du 18<sup>e</sup> siècle, dans l'arc jurassien et en Franche-Comté, il était courant que les verriers réalisent leurs propres creusets entre deux campagnes; ils évitaient toutefois d'en produire l'hiver en raison des risques de gel<sup>440</sup>. Hansjosef Maus corrobore cette affirmation et rapporte que les verriers de Forêt-Noire confectionnaient leurs propres creusets avec une argile blanche importée, notamment des terres soleuroises, les leurs en étant dépourvues<sup>441</sup>. On apprend encore qu'à la verrerie de Biau-fond (Essert d'Iles), au bord du Doubs, un certain Grüner, amodiatiaire de l'ouvreau du notaire Gygon, utilisait des creusets défectueux réalisés par ses soins<sup>442</sup>. Il semblerait donc à l'appui de ces affirmations que les verriers réalisent leurs propres creusets; ainsi sont-ils seuls responsables en cas de pépin.

### 5.8.1.1 Etat de la question

La forme et la taille des creusets ont changé au cours des siècles. La communication de Hans-Georg Stephan – parue en 2003 dans les actes du deuxième symposium sur les verreries en Europe – permet de bien appréhender cette évolution typologique à travers les âges. Les premiers exemplaires connus proviennent de l'Égypte ancienne et sont datés du 15<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ. De petite taille et conçus pour une production artisanale, ces pots dont l'ouverture est circulaire ne pouvaient recueillir qu'une faible quantité de verre. En lien avec l'invention de la canne à souffler, la production verrière « de masse » apparaît vers les débuts de l'ère chrétienne. Elle n'implique toutefois pas une augmentation marquée du volume des creusets. Ceux-ci demeurent circulaires à l'époque romaine et ne contiennent encore généralement que quelques litres. La production verrière du Haut Moyen Âge demeure mal connue. Il faut attendre le milieu du 12<sup>e</sup> siècle pour voir apparaître en Europe une nouvelle forme de pots spécifique à la fonte du verre. Ces creusets coniques aux bords rentrants ont la forme d'un bol. Leurs parois sont généralement épaisses et leurs fonds larges. Leur volume augmente également de façon notable. Par exemple, sur le site de Glaswasen près de

Tübingen en Allemagne, daté du 15<sup>e</sup> siècle, trois différents types de creusets ont été mis en évidence: petits, moyens et grands. Les premiers ont une contenance de 8 à 10 litres et sont de forme circulaire. Les moyens (35 à 50 litres) et les grands (55 à 160 litres) présentent une ouverture de forme ovale, ce qui devient fréquent à l'époque moderne<sup>443</sup>.

Si les creusets de la seconde partie du Moyen Âge ont déjà fait l'objet d'un certain nombre d'études archéologiques, grâce aux travaux de Danièle Foy<sup>444</sup>, Rudolf Bergmann<sup>445</sup> et Hans-Georg Stephan<sup>446</sup> entre autres, les données publiées pour l'époque moderne demeurent rares. La grande quantité et l'état fragmentaire des creusets fait qu'on leur porte souvent peu d'intérêt<sup>447</sup>. Les creusets de Salzwiesen dans le Nassachtal, datés des 15<sup>e</sup>-16<sup>e</sup> siècles, sont coniques; leur volume pouvait atteindre 45 litre, bien qu'ils n'aient sans doute pas été remplis jusqu'au bord<sup>448</sup>. Pour le 18<sup>e</sup> siècle, le site de Flühli dans le canton de Lucerne en a livré de forme conique ovale selon deux tailles différentes. Le fond de la première mesure 18 × 25 cm et celui de la seconde, 14 × 22 cm<sup>449</sup>. En République Tchèque, ceux de la verrerie de Broumy, datée de 1599 à la fin du 17<sup>e</sup> siècle, sont également de même forme, mais se présentent en trois formats<sup>450</sup>, tout comme ceux de Reichenau en Autriche, datés du 17<sup>e</sup> siècle. Dans ce dernier cas, le fond des plus grands creusets mesure 30 à 36 cm de diamètre. Les pots peuvent contenir 20 à 30 litres de verre. L'état très fragmentaire des individus ne semble toutefois pas permettre d'affirmer s'il s'agit de récipients circulaires ou ovalaires<sup>451</sup>.

Divers traités anciens mentionnent les creusets. Vers 1125, Théophile offre déjà une description de pots coniques: « Ils doivent être larges à la partie supérieure, étroits à la partie inférieure, et munis à l'orifice d'une petite bordure intérieurement recourbée »<sup>452</sup>. Curieusement, ce sont des pots plutôt ventrus qui sont décrits et illustrés par Agricola en 1556<sup>453</sup>, tandis qu'un siècle plus tard, Merrett revient à une forme évasée<sup>454</sup>. Ils sont de forme triangulaire et cylindrique sur les illustrations de Frisius, qui affirme que le premier type est en usage à Amsterdam (NL) et le second, à Haarlem (NL)<sup>455</sup>. Les encyclopédies et manuels verriers des 18<sup>e</sup> et 19<sup>e</sup> siècles proposent de

440 Michel 1989, 225.

441 Maus/Jenisch 1998, 344 et 353.

442 AAEB Audiences seigneuriales, Franches-Montagnes 2 juin 1753; Schwab (s.d), 32.

443 Stephan 2003, 136-151.

444 Foy 1989, 171-187.

445 Bergmann et al. 2008, 76-81 et 141-142.

446 Stephan 1998.

447 Stephan 2003, 151-153.

448 Lang 2001, 95.

449 Descœudres/Horat/Stöckli 1985, 31.

450 Žegklitz 2007, 165.

451 Tarcay 2009, 83-97.

452 Théophile c.1125/1843, 83.

453 Agricola 1556/1992, 475-478.

454 Merrett 1662/2006, 304.

455 Frisius 1668, 450.

précieuses indications sur la nature de la terre à utiliser, la fabrication des pots et leur mise en œuvre<sup>456</sup>. Ces concepts sont repris et approfondis en 1953 par Alfred B. Searle dans son ouvrage *Refractory materials. Their manufacture and use*<sup>457</sup>. Il convient encore de mentionner les études archéométriques réalisées par Bernhard Watzke<sup>458</sup>, Bernhard Brinker et Ulrich Schüssler<sup>459</sup>, de même que Giacomo Eramo<sup>460</sup>. Ce dernier a effectué l'analyse archéométrique des creusets du Pâturage de l'Envers et a notamment étudié les origines des terres utilisées.

### 5.8.1.2 Récolte sur le terrain

Au Pâturage de l'Envers, on retrouve des tessons de creusets, accompagnés de céramiques, éparpillés sur l'ensemble du site verrier, parfois même à plus de 100 m de la halle. Cet éparpillement est étrange. Une dispersion mécanique postérieure à l'abandon n'entre guère en ligne de compte : les espaces déboisés se sont naturellement transformés en pâturage et ont été rapidement afferchés<sup>461</sup>, sans qu'aucune exploitation intensive des terres, trop maigres, n'ait été envisageable. La dispersion remonte donc au roulement de la verrerie. Des creusets usagés quasi intacts ont été retrouvés dans les habitations, témoignant d'une réutilisation secondaire (voir chap. 5.8.2.4). Il n'est pas exclu que des habitations plus frustes, des baraquements, aient existé dans partie basse du site, autour du secteur E, et n'aient pas été repérées par les sondages.

Les creusets mis au jour étaient tous fortement éclatés. Dans la halle et les zones de rejet attenantes, des milliers de tessons ont été découverts. Il a donc été difficile de mettre en évidence des exemplaires complets. En revanche, dans les secteurs d'habitat, la situation était plus favorable car certains creusets ont été réutilisés. Quand les verriers effectuaient des réparations sur le four, ils le démontraient en partie et en profitaient pour remplacer ces récipients. Les exemplaires restés entiers étaient prélevés et réutilisés à d'autres fins, par exemple pour stocker du matériel domestique dans les habitations. Lors de l'abandon du site, ces pièces en réemploi se sont retrouvées piégées dans le comblement des caves, formant ainsi des ensembles clos. Il a alors été aisé de distinguer et de remonter les différents pots.

Lors de la première campagne de fouille, tous les tessons ont été pesés et collectés. Les morceaux provenant d'un même creuset ont, quant à eux, été groupés et placés au sein d'un même sachet afin de faciliter le remontage. Au vu de la masse de matériel prélevée, une sélection a été effectuée dès la deuxième année. Les bords et les fonds ont systématiquement été ramassés. Ce sont les seules parties susceptibles de livrer des informations et qui permettent, à l'occasion, des remontages. Quant aux tessons de paroi, seuls les éléments mesurant plus de dix centimètres ont été récoltés. Malheureusement, il n'a été procédé à aucun décompte des fragments non conservés. Les petits creusets, en raison de leur rareté, ont systématiquement été récoltés. Au total, 2240 kg de tessons ont été mis au jour sur le site du Pâturage de l'Envers. A cela, s'ajoutent les creusets encore enfouis dans les crassiers non-fouillés (réserve archéologique), dont le poids est impossible à estimer.

### 5.8.1.3 Sélection pour l'étude

Dans un premier temps, le corpus de creusets sélectionné au sein des quelques 2200 kg de matériel a été inventorié et pesé ; cette opération a été effectuée par contexte et débouche sur un total de 12 029 tessons représentant un poids de 677 kg, soit un tiers du corpus total pesé. La grande similitude de l'aspect extérieur des tessons, la faible variabilité des fonds et des bords a rendu la définition d'individus difficile. Les bords et les fonds ont été systématiquement prélevés en cours de fouille (voir chap. 3.2.2) ; des remontages ont été effectués au sein des complexes, puis entre les complexes d'une même zone et, pour finir, entre plusieurs zones. Les trop grandes variations caractérisant les tessons (couleur, vitrification, pâte, etc.) ont rendu difficile l'association des éléments de paroi à ceux des bords. Cette étape étant trop fastidieuse, il a été décidé de ne pas s'aventurer plus avant dans les remontages, pour opter plutôt en faveur d'une méthode de quantification par le poids.

Puisqu'en cours de fouille, tous les fragments de creusets ont été pesés, cette méthode a tout de même permis de proposer une approximation du nombre de pots utilisés durant l'exploitation de la verrerie. Un certain nombre

456 Diderot/D'Alembert 1765c, 104-105 ; Al-lut 1791, 442 ; Loysel 1799/1800, 29-30 et 57-61 ; Keess 1822, 848-850 ; Peligot 1862, 23-28 ; Bon-temps 1868, 112-136.

457 Searle 1953.

458 Watzke 2004.

459 Brinker/Schüssler 2003.

460 Eramo 2005a ; Eramo 2005b ; Eramo 2006a ; Eramo 2006c ; Eramo 2006d.

461 Gerber 2010, 123, note 165.



de remontages a toutefois pu être effectué. Au total, 55 creusets, entiers ou fragmentaires, ont été individualisés : 39 grands et 16 petits. Les premiers étaient utilisés pour fondre le verre, mais la fonction des seconds n'est pas claire. On suppose qu'ils contenaient de petites quantités de verre de couleur utilisées pour décorer certains récipients.

Les critères de sélection des individus retenus pour l'étude étaient essentiellement l'état de conservation et la représentativité des sujets, puisqu'ils devaient être possible d'y effectuer différentes mesures (largeur, longueur, épaisseur des parois, poids, contenance, etc.). Seule une partie de ces individus a été retenue pour le catalogue. Afin d'éviter toute confusion dans le texte, les creusets figurant au catalogue apparaissent sous leur numéro de catalogue, sous la forme « cat. » suivi d'un numéro (par exemple cat. 5). Les exemplaires non illustrés gardent leur dénomination « individu » suivi d'un numéro<sup>462</sup>.

## 5.8.2 Grands creusets

Les grands creusets sont de forme ovale : cette dernière devait permettre une certaine économie d'espace dans la chambre de fusion et permettre le passage des creusets par des ouvertures plutôt petites<sup>463</sup>. Ils ont été fabriqués à partir d'une argile sableuse de couleur blanche à beige-jaune d'origine sidérolithique (fig. 159-160).

### 5.8.2.1 Données techniques

Malgré le faible nombre de creusets entiers, il a été possible de déterminer les dimensions moyennes des récipients (fig. 161) grâce à huit exemplaires particuliers. Leur contenance moyenne est d'environ 12 litres<sup>464</sup> et leur poids de 13 kg. En multipliant le poids spécifique du verre (arrondi à 2,5) par le volume, on obtient 30 kg de verre en fusion par creuset. Sachant qu'au moins 2240 kg de creusets ont été

Fig. 159 : Court, Pâturage de l'Envers. Grands creusets complets (cat. 2 et 12). Ech. 1:6.



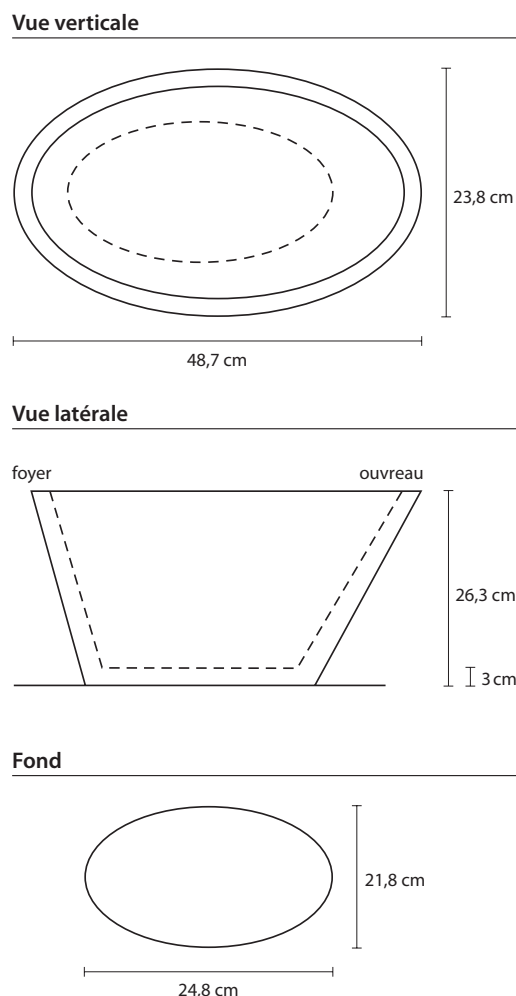
Fig. 160 : Court, Pâturage de l'Envers. Grands creusets : deux exemples partiellement remontés. De gauche à droite, cat. 2 et 3. Ech. 1:6.

<sup>462</sup> Distinction ind./cat. voir la note 412.

<sup>463</sup> Eramo 2005b, 18.

<sup>464</sup> Cette mesure a été effectuée de manière empirique sur des creusets complets, dont l'intérieur protégé par un film plastique a été rempli d'eau au moyen d'une mesure graduée.

Fig. 161 : Court, Pâturage de l'Envers. Dimensions moyennes du creuset type utilisé sur le site.



retrouvés, un rapide calcul permet d'évaluer à 172 le nombre minimum de récipients utilisés durant l'exploitation de la verrerie. Bien que les creusets aient tous la même forme tronconique générale, on remarque quelques variations au niveau des dimensions des récipients, de l'épaisseur de leurs parois et fonds. Toutefois, ces différences ne permettent pas de distinguer à proprement parler des types différents. Certains creusets, à l'image des cat. 1, 3, 6 et 12 (pl. 1, 2 et 4) sont plus allongés, avec une longueur moyenne de 52,1 cm. D'autres d'aspect plus ramassé accusent jusqu'à 10 cm de moins, comme par exemple les cat. 2, 7-9 (pl. 1 et pl. 3). Leurs parois frontales sont obliques, parfois très redressées comme sur la pièce cat. 2 (pl. 1). Les fonds sont massifs : leur épaisseur atteint en moyenne 4 cm.

La variabilité observée peut à notre avis s'expliquer par deux facteurs principaux : la technique de façonnage et les contraintes de chaleur et de pression exercées par le four et

le verre en fusion sur les parois du pot<sup>465</sup>. Il est envisageable aussi que la position occupée par le creuset dans le four ait pu déterminer sa forme et sa taille, en particulier si les banquettes n'étaient pas parfaitement symétriques. Ainsi, les artisans auraient-ils pu ou dû adapter la forme de leurs pots.

### 5.8.2.2 Fabrication

Les creusets se montent à la main, avec ou sans moule. Pour la première méthode, le pot se fabrique dans un moule en bois garni d'une toile pour éviter que la terre humide n'adhère aux parois. Le potier – ou le verrier, selon qu'il confectionne ses propres creusets (chap. 5.8.1) – commence par modeler le fond sur un fonceau ; puis, lorsque le fond atteint l'épaisseur désirée, il place le moule sur le fonceau. L'artisan forme ensuite le creuset en appliquant successivement des rouleaux de pâte – aussi appelés pastons ou colombins – « les uns au-dessus des autres, à demi épaisseur, en les soudant d'abord à la main, puis les pressant et les frappant soit avec la main, soit avec une batte en bois ou une molette de verre »<sup>466</sup>.

Dans le second cas de figure, « le potier qui n'utilise pas de moule réalise son fond de la même manière [...] puis monte son tour de pot avec des pastons disposés de la même manière que pour le pot moulé ; mais, au lieu d'appuyer contre le moule, il soutient avec la main gauche la terre déjà posée, contre laquelle il appuie son paston avec la main droite »<sup>467</sup>. Lorsque le pot est terminé et que sa surface a été lissée, il est recouvert d'un tissu mouillé pour éviter qu'il ne sèche trop rapidement<sup>468</sup>. Quand la période de séchage est achevée – elle dure entre six et huit mois – les creusets sont chauffés en deux étapes<sup>469</sup>. Comme ils sont extrêmement fragiles, ils doivent être manipulés avec précaution, en évitant les chocs et les coups. Pour Searle, le meilleur moyen de déplacer les récipients est d'utiliser une sorte de brancard<sup>470</sup>. Ils sont tout d'abord placés dans une arche ou un four séparé, à une température de 800 à 1000° C, avant d'être déposés dans le four de fusion. Loysel indique qu'un pot neuf doit séjourner vide dans le four, durant 25 à 40 heures, avant d'y introduire des matières vitrifiables, ceci afin d'éviter tout choc thermique<sup>471</sup>.

465 Bontemps 1868, 137.

466 Loysel 1799/1800, 58.

467 Bontemps 1868, 129.

468 Searle 1953, 654.

469 Diderot/D'Alembert 1765c, 126.

470 Searle 1953, 655.

471 Loysel 1799/1800, 61.

Pour les grands creusets du Pâturage de l'Envers, Giacomo Eramo réfute l'hypothèse du moulage car, quoiqu'ils soient semblables d'un point de vue typologique, leurs dimensions offrent une variabilité trop marquée<sup>472</sup>. Cette idée est confortée par un passage de l'*Essai sur l'art de la verrerie* de Jean-Baptiste Loysel. L'auteur y explique que la technique de fabrication sans moule est considérée comme étant la meilleure, car « l'ouvrier sent sous ses mains les pores un peu considérables, qui peuvent rester dans la pâte par le mouvement et la réaction de l'air qui s'y trouve enfermé. Il peut donc lui donner une issue, et remplir le vide, ce qui ne s'aperçoit pas de même quand il opère dans un moule »<sup>473</sup>. Mais, la variabilité dimensionnelle mesurée pourrait provenir de l'usage de moules différents, surtout si chaque verrier est responsable de ses propres creusets.

Or on constate, en observant la matrice à l'aide d'une loupe, que la pâte de tous les creusets présente des vacuoles. Certains exemplaires<sup>474</sup>, dont les parois extérieures sont peu ou pas vitrifiées, révèlent des traces de lissage à la main. Toutefois, ce détail seul ne suffit pas à déterminer si les pots étaient ou non moulés. L'observation de la tranche des creusets n'a pas révélé de traces de colombins. Le creuset cat. 2 (fig. 162) dévoile une spécificité : la paroi présente deux couches distinctes. Par endroits, l'une d'entre elles s'est détachée et l'on aperçoit la seconde. De plus, en observant la pâte, on remarque des fissures, bien définies. Cette particularité est peut-être un indice des techniques de moulage. Certaines pièces (cat. 1, 9, 12 et ind. 14, 15 et 31) montrent également de rares fissures dans leur matrice. Elles sont toutefois moins franches que celles observées sur le cat. 2. Il pourrait s'agir de vacuoles dues à une mauvaise préparation de la pâte.

Treize individus<sup>475</sup> présentent une surface de pose concave. Le séchage se déroulait en deux temps : d'abord les pots étaient laissés sur le fond, dans leur position de façonnage, puis ils étaient retournés et posés sur le bord pour permettre au fond de sécher. C'est à ce stade que l'affaissement progressif de ce dernier s'opérait. Soit de façon naturelle, sous l'effet de son propre poids, soit de manière intentionnelle, les artisans accentuant le phénomène en y déposant un anneau (poids). L'utilité d'un fond concave est évidente puisqu'elle



Fig. 162 : Court, Pâturage de l'Envers. Détail de la paroi d'un creuset. La fracture verticale du corps céramique trahit un rhabillage par ajout de matière sur la paroi durant la confection du pot. Cat. 2. Ech. 1:1.



Fig. 163 : Court, Pâturage de l'Envers. Détail de la surface de pose d'un creuset. Les stries visibles témoignent de l'utilisation d'une planche de bois (fonceau) pour son montage. Ind. 10. Ech. 1:3.

facilite la pose du creuset sur la banquette, surtout si celle-ci n'est pas parfaitement plane. Cinq creusets (cat. 1, 11, et ind. 10, 14 et 38) dévoilent des stries sur le fond (fig. 163). On imagine que ces marques ont été laissées par le fonceau lors de la fabrication. L'individu 21 est un raté de cuisson qui a probablement éclaté lors de l'attrempage (fig. 164). Sa surface à peine grésée est bien conservée ; elle révèle des indications quant au façonnage. On constate que les faces externes et internes ont été lissées, probablement à la main avec un peu d'eau. Le faible nombre de tessons peu cuits ayant cet aspect grésé pourrait témoigner de la rareté des accidents d'attrempage, ce qui soulignerait le soin apporté à la confection des creusets.

472 Eramo 2005b, 18.

473 Loysel 1799/1800, 58.

474 Cat. 5 et 11 et ind. 21 et 30.

475 Cat. 1, 2 et 4, 10, ind. 9 et 10, cat. 7, 9, 6, 11, 12, ind. 14 et 38.





Fig. 164 : Court, Pâturage de l'Envers. Creuset. Fragments d'un raté de cuisson, face extérieure (en haut), face intérieure (en bas). Les traces de façonnage à la main sont parfaitement visibles. Ind. 21. Ech. 1:3.



Fig. 165 : Court, Pâturage de l'Envers. Aspect typique du bord d'un creuset orienté vers l'ouvrage : le bord aminci présente une croûte blanchâtre, mate. Cat. 12. Ech. 1:3.



Fig. 166 : Court, Pâturage de l'Envers. Détail du niveau de remplissage d'un creuset. Ind. 31. Ech. 1:3.



476 Diderot/D'Alembert 1765c, 116; Diderot/D'Alembert 1772/2002, *Verrerie en bois, première section*, pl. VII.

477 Foy 1989, 171 et 173; Michel 1989, 223; Philippe 1998, 149.

478 Eramo 2005b, 20.

479 Eramo 2005b, 37.

480 Pfirter et al. 1996.

L'*Encyclopédie* indique que les creusets usagés sont recyclés et utilisés comme dégraissant lors du façonnage de nouveaux exemplaires<sup>476</sup>. Cette affirmation a également été reprise par plusieurs auteurs modernes<sup>477</sup>. Cependant, après avoir réalisé des analyses pétrographiques, Eramo conteste cette usage pour les creusets du Pâturage de l'Envers : « The crucible fragments found in the workshop area are only few centimeters in size, pointing to an intentional breaking after their use. According to many authors, used crucibles were broken, milled and sieved to recycle them as temper. [...] As for the crucible of Derrière Sairoche, there is no petrographic evidence of crucible fragments in the ceramic body. It must be kept in mind that even if the crucibles were tempered with very fine fragments difficult to detect under the microscope, some chemical contamination due to glass adhering to the surface must have been unavoidable »<sup>478</sup>. En outre, il précise que le recyclage ne devait pas être pertinent d'un point de vue économique, étant donné la proximité des gisements d'argile réfractaire<sup>479</sup>.

Les analyses minéralogiques des creusets ont démontré que l'argile utilisée était riche en kaolinite ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et en sable quartzueux ( $\text{SiO}_2$ ) très pur (voir chap. 5.8.2.5). Or de telles argiles sableuses existent localement dans la vallée de Tavannes et dans le Petit-Val par exemple (voir chap. 2.1.1 et 5.6.4). D'ailleurs, les lieux d'extraction, parfois encore visibles dans le terrain, sont répertoriés sur les cartes géologiques. Naturellement, puis au gré de leur exploitation, ces gisements ont vu les fines particules argileuses migrer par gravitation vers le fond de la poche, avec pour conséquence la formation d'une couche imperméable. Ceci explique la formation du petit lac, appelé le lac Vert, au nord-ouest de Court ou les étangs du Mont-Girod<sup>480</sup>.

### 5.8.2.3 Traces d'utilisation

Le travail des verriers et la chaleur ont marqué les creusets. Le bord situé face à l'ouvrage est généralement aminci et évasé. Cette altération est le résultat du frottement répété de la canne. De plus, à cet endroit, la paroi intérieure présente une croûte blanchâtre mate (fig. 165). On retrouve un encroûtement similaire ainsi



que des coulures sur la paroi extérieure, sous le bord. Quatre creusets (cat. 6, 12 et ind. 30-31) conservent encore la marque du niveau de remplissage (fig. 166). Celle-ci est horizontale sur le cat. 6 et l'ind. 30 et un peu inclinée sur l'individu 31. Comme les banquettes du four devaient présenter une surface inégale en raison de la vitrification de la surface et des coulures de verre, les creusets devaient être calés afin d'être en position horizontale. Il se peut que les éventuelles cales aient, dans certains cas, bougé ou fondu. Eramo nous a signalé cette pratique observée dans la verrerie de Fornasier à Murano (IT) ; un verrier y calait les récipients avec du groisil ou des fragments de verre brut avant la mise en route du four.

L'exposition des creusets aux hautes températures du four de fusion a aussi laissé différentes marques. L'effet corrosif du verre est surtout évident sur la face intérieure, qui était en contact continu avec le verre en fusion. La paroi extérieure montre une surface vitrifiée et des crevasses ; il s'agit de sillons plus ou moins verticaux qui peuvent évoluer jusqu'à la fissure. L'observation des récipients révèle d'autres attaques dues au feu. La plus fréquente est la vitrification interne dans le corps de la paroi, que l'on discerne sur les cat. 2, 6, 7, 9 et 12 ainsi que sur les individus 14, 24, 27-28 et 36 (fig. 167). Certaines pièces montrent des traces d'écoulement consécutives à l'éclatement du creuset (cat. 4 et ind. 7, fig. 168) ou des fissures perforantes vitrifiées (cat. 2, fig. 169). Les creusets cat. 9 et ind. 35 présentent des fonds amincis et/ou percés par le verre en fusion (fig. 170).

Plusieurs pots (cat. 1, 2, 12 et ind. 1, 7 et 28) révèlent des résidus d'argile réfractaire qui se sont collés sur la paroi déjà vitrifiée. Il s'agit de traces de contact avec le creuset voisin. Sous la pression de la masse du verre liquide, les pots ont tendance à « prendre du ventre »<sup>481</sup>. Cette déformation s'opère sur les grands côtés et il peut occasionner un contact entre les pots. Le risque de rupture des récipients est alors accru. De plus, comme la chaleur ne peut plus circuler correctement, la fonte pourrait en être affectée voire ralentie. Le bord de l'individu 28 montre un petit amas d'argile réfractaire : il s'agit probablement d'un morceau de paroi qui est tombé sur le creuset (fig. 171). Les pièces cat. 5 et 11, ainsi que l'individu 30 ont visible-



Fig. 167 : Court, Pâturage de l'Envers. Les traces de vitrification s'observent jusque dans la matrice du creuset. Ind. 27. Ech. 1:2.

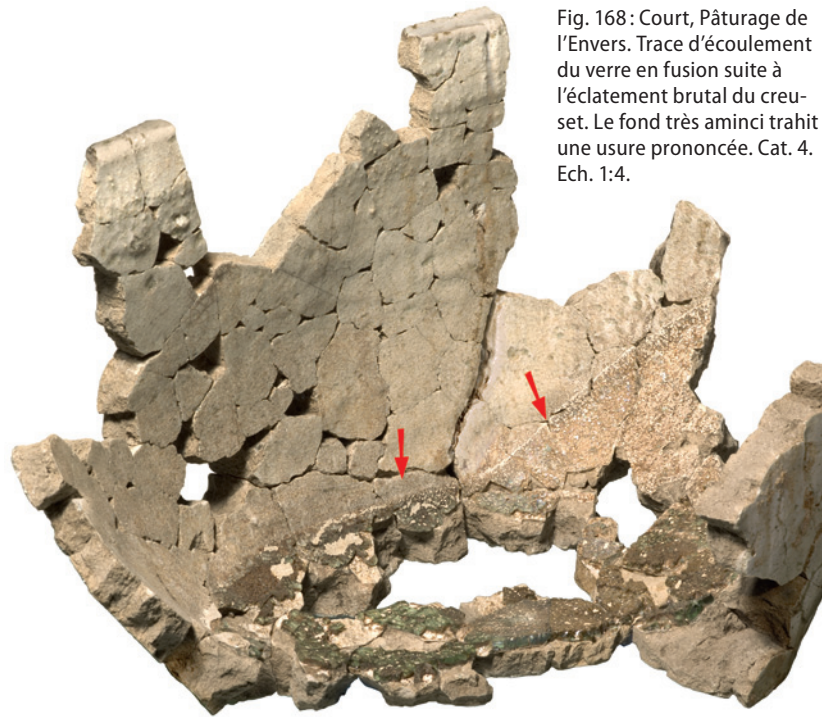


Fig. 168 : Court, Pâturage de l'Envers. Trace d'écoulement du verre en fusion suite à l'éclatement brutal du creuset. Le fond très aminci trahit une usure prononcée. Cat. 4. Ech. 1:4.



Fig. 169 : Court, Pâturage de l'Envers. Détail d'une fissure perforante remplie de verre observée sur le creuset cat. 2. Ech. 1:2.



Fig. 170 : Court, Pâturage de l'Envers. Fond de creuset aminci et percé par le verre en fusion. Cat. 9. Ech. 1:3.

<sup>481</sup> Bontemps 1868, 114.



Fig. 171 : Court, Pâturage de l'Envers. Fragment de voûte tombé sur le bord d'un creuset. Ind. 28. Ech. 1:2.



Fig. 172 : Court, Pâturage de l'Envers. Grands creusets peu vitrifiés ; leurs faces extérieures présentent un aspect grésé. Cat. 5 et 11. Ech. 1:4.

secteur	zone	poids (kg)	m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>
A	1	20,2	47,2	0,43
	2	181,4	93,6	1,94
	3	38,9	25,7	1,51
	4.1	1,6	12,5	0,13
	4.2	12,4	19,6	0,63
	4.3	44,3	60,8	0,73
	4.4	10,3	31,3	0,33
	4.5	1,0	21,8	>0,04
	5	123,4	37,3	3,31
	6	60,0	101,9	0,59
	7	231,4	45,2	5,12
	8	141,6	52,5	2,70
	9	443,7	85,5	5,19
C	10	146,6	76,5	1,92
	11	51,5	68,8	0,75
	12	39,1	54,8	0,71
	13	108,0	93,0	1,16
	habitation 2	167,3	89,2	1,88
D	habitation 3	127,9	184,5	0,69
	surface 5	6,8	90,0	0,08
	surface 7	216,5	358,7	0,60
	surface 8	8,6	61,2	0,14
E	habitation 1	15,4	51,0	0,30
	habitation 4	0,7	60,0	>0,01
F		9,3	168,0	0,06
H		18,6	27,5	0,68
L	surface 9	13,5	24,0	0,56
G	tache 2	0,0	30,0	>0,00
		0,9	100,0	>0,01
total		2240,8	2172,1	1,03

Fig. 173 : Court, Pâturage de l'Envers. Tableau récapitulatif du pesage des creusets par secteur et zone.

ment subi une défaillance. En effet, ces exemplaires sont très peu vitrifiés (fig. 172). Leur paroi extérieure présente uniquement l'aspect gréséux qui survient à partir d'une température de cuisson de 1200° à 1300° C. Il semble que ces récipients se soient brisés après une courte période d'utilisation, voire déjà au cours de l'attrempage.

#### 5.8.2.4 Répartition spatiale

Comme mentionné précédemment, 2240 kg de creusets fragmentés ont été mis au jour, dont 1655 kg dans le seul secteur A. La répartition des découvertes est assez claire : près de 68 % proviennent des zones ceinturant la halle<sup>482</sup>, avec une prédominance au niveau de l'angle nord-est ; 8,6 % sont issus de l'espace situé autour du four de fusion et 14 % des zones d'habitation. Le solde se répartit entre différents espaces périphériques<sup>483</sup> (fig. 173). La distribution des creusets dans et aux abords de la halle (fig. 174) révèle deux zones particulièrement riches : les zones 7 et 9, avec respectivement 231 et 443 kg. Notons que la zone 5 livre aussi une quantité importante de tessons de creusets. Des concentrations spécifiques se développent au nord et à l'est du four A164. Ce dernier, décrit dans le premier volume<sup>484</sup>, présente des traces de calcination visibles en particulier sur le parement calcaire interne du canal de chauffe. Ces traces sont le signe d'une température de fonction élevée et durable, aisément atteinte dans un foyer-canal bien ventilé. Rappelons que le calcaire subit un début de calcination à partir de 900° C environ. Dans l'exploitation traditionnelle d'une verrerie, deux activités, hormis la fusion, nécessitent l'usage de fours : la précuisson (attrempage) des creusets et le frittage de la composition vitrifiable. L'attrempage se déroule jusqu'à des températures de 1000-1100° C<sup>485</sup>, bien supérieures à celles nécessaires au frittage.

La forte concentration de débris de pots autour du four A164 et de son aire de travail suggère un lien avec l'attrempage des récipients. Le problème est que nous n'avons pas connaissance de l'aspect d'un creuset attrempé. On imagine que sa surface est légèrement grésée (cat. 5, 11 et ind. 30, fig. 175), mais les récipients peu vitrifiés sont curieusement rares autour du four A164. L'hypothèse

482 Secteur A, zones 8, 10, 12 et 13. A noter que le cras-sier principal s'étend dans les zones 1, 3 et 5.

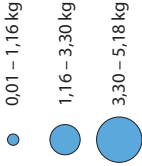
483 Secteurs : A, zone 9 ; C, zone 5 et 8 ; D, E et F.

484 Voir Gerber 2010, chap. 2.2.4 et 2.2.5.

485 Les températures étant rarement mentionnées dans les textes, nous nous sommes inspirés du graphique publié par l'entreprise Fastner & Co GmbH spécialisée dans la confection de creusets verriers. Voir <http://www.fahaf.de> (page consultée le 4 avril 2012).

595 700

Quantité moyenne de creusets collectée par mètre carré (kg)



595 600



Fig. 174: Court, Pâturage de l'Envers. Carte figurant les quantités de creusets collectés au mètre carré par secteur et zone. Les charbonnières n'ont pas été considérées. Ech. 1:1000.

232 000

231 900



échantillon	cont.	type de fragment	couleur	épaisseur (mm)	vitrification	corrosion	fracture
BC1	100620	bord	blanc	16	gouttes, ext.	rainures ext.	–
BC2	100620	fond	gris	27	couche, int. + ext.	–	–
BC3	100620	fond	jaune clair	21	couche, int. ; gouttes, ext.	–	–
BC4	100620	fond	gris	23	couche, int. + ext.	–	–
BC5	100620	paroi	gris	20	couche, int. ; gouttes, ext.	–	–
BC6	100620	bord	ocre clair	24	couche, int.	–	–
BC7	100620	paroi	gris clair	27	couche, int.	trous int.	extérieure
BC8	100620	paroi	jaune clair	18	gouttes, int. + ext.	–	traversante
BC9	100620	paroi	gris	20	couche, int. + ext.	–	–
BC10	100620	bord	gris	15	–	–	–
BC11	100620	paroi	gris foncé	15	couche, int. + ext.	–	–
BC12	100620	bord	jaune clair	19	–	rainures ext.	traversante
BC13	100620	bord	violet clair	10	couche, int. + ext.	–	–
BC14	100620	paroi	violet clair	25	couche, int. + ext.	–	–
BC15	100620	paroi	jaune clair	18	couche, int. + ext.	–	–
BC16	100620	paroi	gris foncé	15	couche, int. + ext.	–	–
BC17	100620	paroi	blanc	23	–	rainures ext.	–
BC18	100620	paroi	gris	21	–	–	extérieure
BC19	100620	fond	blanc	13	couche, int.	–	–
BC20	100620	fond	gris foncé	10	couche, int. + ext.	cœur fondu	–
BC21	100620	bord	gris clair	21	couche, int. + ext.	–	–
BC22	100620	bord	gris	18	gouttes, int.	–	–
BC23	100620	paroi	gris clair	31	couche, int. + ext.	–	–
BC24	100620	bord	jaune	21	–	rainures ext. ; trous int.	–
BC25	100620	paroi	violet clair	28	couche, int. + ext.	–	–
BC26	100620	fond	gris clair	23	couche, int. + ext.	–	extérieure
BC27	100620	paroi	jaune	29	couche, int. + ext.	–	–
BC28	100620	bord	blanc	19	–	rainures ext. ; trous int.	extérieure
BC29	100620	bord	violet	15	couche, int. + ext.	–	–
BC30	100620	bord	gris	30	couche, int. + ext.	–	–
BC31	100620	fond	gris foncé	20	couche, int. + ext.	–	–
BC32	100620	fond	gris foncé	27	couche, int. + ext.	–	extérieure
BC33	100620	bord	gris foncé	14	couche, int. + ext.	–	–
BC34	100620	bord	jaune	18	couche, int. + ext.	rainures ext.	–
BC35	100620	paroi	violet foncé	24	couche, int. + ext.	–	–
BC36	100620	bord	gris	20	couche, int. + ext.	–	–
BC37	100620	fond	gris clair	27	couche, int. + ext.	trous int.	–
BC38	100620	paroi	violet clair	22	couche, int.	–	–
BC39	100620	fond	ocre	23	couche, int. + ext.	–	extérieure
BC40	100620	fond	gris	20	couche, int. ; gouttes, ext.	rainures ext.	extérieure
BC41	100620	paroi	violet	20	couche, int. + ext.	infiltration	–
BC42	100620	bord	jaune	18	couche, int.	–	–
BC43	100620	bord	gris	19	couche, int. + ext.	–	–
BC44	100620	bord	violet	10	couche, int. + ext.	–	–
BC45	100620	fond	gris	23	couche, int. ; gouttes, ext.	trous int.	–
BC46	100620	fond	gris clair	31	couche, int.	–	extérieure
BC47	100620	fond	gris	19	couche, int.	trous int.	–
BC48	100620	fond	gris	23	couche, int.	trous int.	–
BC49	100620	fond	jaune/violet	25	couche, int. + ext.	trous int.	–
BC50	100620	bord	gris	25	couche, int. + ext.	trous int.	–
BC51	100620	bord	gris	17	couche, int. + ext.	–	–
BC52	100620	fond	gris clair	21	–	–	–
BC53	100620	fond	gris	19	couche, int.	trous int.	–

MO = microscopie optique ; AG = analyse granulométrique ; XRD = diffraction de rayons X ; PF = perte au feu ; XRF = fluorescence de rayons X

Fig. 175 : Court, Sous les Roches (1673-1699). Liste et caractérisation des échantillons de creusets prélevés dans la « Collection René Bassin » à des fins d'analyse.

de la récupération des fonds des creusets pour y détacher le verre accumulé en vue d'une re-fonte a également été avancée. Néanmoins, aucune trace de piquage n'a pu être mise en évidence. De surcroît, les quantités de verre à récupérer paraissent dérisoires eu égard au volume de cassons produit quotidiennement ; ensuite la qualité de ce verre résiduel stagnant

au fond des creusets semble peu intéressante (aspect laiteux, blanchâtre et opaque). Les verriers avaient, semble-t-il, l'habitude de vider, de nettoyer, le contenu des creusets. En conclusion, nous arrivons mal à expliquer la concentration de ces amas de fragments autour du four A164. Notons que des observations identiques, plaquées sur une organisation



remarques	méthodes d'analyse				
	MO	AG	XRD	PF	XRF
sable non fondu 3 cm au-dessous du bord	X	X	X	X	X
points noirs à l'extérieur	X	X	X	X	X
pâte zonée, blanche en surface	X	X	X	X	X
verre brun	X	X	X	X	X
sable non fondu à l'intérieur	X	X	X	X	X
points noirs sur bord	X	X	X	X	X
pâte zonée, blanche en surface	X	X	X	X	X
verre brun à l'extérieur	X	X	X	X	X
verre bleuté	X	X	X	X	X
traces d'outil à l'extérieur	X	X	X	X	X
pâte zonée, noire vers la surface ; verre sur fractures	X	X	X	X	X
–	X	X	X	X	X
petit creuset	X	X	X	X	X
–	X	X	X	X	X
–	X	X	X	X	X
verre noir	X	X	X	X	X
–	X	X	X	X	X
strie sur face extérieure	X	X	X	X	X
petit creuset ; verre bleu à l'intérieur ; vésicules à l'extérieur	X	X	X	X	X
petit creuset ; verre noir	X	X	X	X	X
sable non fondu à l'intérieur ; couche scorifiée à l'extérieur	X	X	X	X	X
sable non fondu 3 cm au-dessous du bord ; verre brun	X	X	X	X	X
couche scorifiée à l'extérieur	X	X	X	X	X
–	X	X	X	X	X
verre vert	X	X	X	X	X
pâte zonée, violet clair sur le fond	X	X	X	X	X
verre bleu	X	X	X	X	X
–	X	X	X	X	X
–	X	X	X	X	X
traces d'outil à l'extérieur ; taches de verre	X	X	X	X	X
scorie collée sous le fond	X	X	X	X	X
–	X	X	X	X	X
pâte zonée, violet clair en surface	X	X	X	X	X
points noirs sur bord	X	X	X	X	X
points noirs à l'intérieur	X	X	X	X	X
traces d'outil à l'extérieur ; taches de verre ; différentes couleurs à l'intérieur	X	X	X	X	X
couche brune sur l'extérieur	X	X	X	X	X
pâte zonée, blanche en surface ; traces d'outil ? sur l'extérieur	X	X	X	X	X
pâte zonée (gris à jaune) ; traces d'outil sur l'extérieur ; taches de verre sur l'extérieur	X	X	X	X	X
pâte zonée (gris à jaune)	X	X	X	X	X
verre noir ; taches rouges opaques	X	X	X	X	X
pâte zonée, blanche en surface	X	X	X	X	X
verre noir ; taches bleues à l'intérieur ; traces d'outils	X	X	X	X	X
gris foncé sur surface de fracture ; fragments de réfractaire collés sur le bord	X	X	X	X	X
traces d'outil à l'extérieur ; taches de verre	X	X	X	X	X
–	X	–	X	X	X
scorie collée sous le fond	X	X	X	X	X
différentes couleurs à l'intérieur ; traces d'outils ?	X	X	X	X	X
scorie collée sous le fond	X	X	X	X	X
points noirs à l'extérieur ; verre vert sur le bord	X	–	X	X	X
verre noir ; taches bleues à l'intérieur	X	X	X	X	X
masse de verre incolore sur le fond ; scorie collée sous le fond ; traces d'outils ?	X	X	X	X	X
pâte zonée (gris à jaune) ; couche de verre de 1 cm sur le fond ; traces d'outils ?	X	X	X	X	X

spatiale similaire, ont été réalisées sur le site de Flühli-Südel<sup>486</sup>.

En ce qui concerne la distribution des individus, la tendance est inversée par rapport à la répartition générale. En effet, la majorité des pots reconstitués (54 %) provient de l'habitat. La halle et l'étenderie ont respectivement livré 18 et 15 % des individus. Les derniers exem-

plaires (13 %) proviennent des zones de rejet et de la zone F (four F49). Cette répartition s'explique aisément. Les habitations forment des ensembles clos qui ont livré un petit nombre de creusets usagés réutilisés à d'autres fins ; il a donc été plus aisé de les remonter et de les individualiser.

### 5.8.2.5 Observations macroscopiques et analyses minéralogiques (GE)

Parmi les milliers de fragments de creusets collectés dans les couches archéologiques autour du four de fusion, 43 ont été analysés du point de vue pétrographique, minéralogique et chimique. Bien que les creusets reconstitués soient similaires d'un strict point de vue typologique (fig. 159 et pl. 1-5), quelques légères variations dans la forme et les dimensions apparaissent néanmoins, ce qui permet d'exclure leur confection dans des moules. Ainsi que le suggèrent les traces de lissage observées sur des pots mal cuits (voir chap. 5.8.2.2), les creusets ont été formés à la main.

L'observation macroscopique révèle un usage à des températures élevées qui ont laissé différentes traces sur les creusets. L'effet corrosif du verre en fusion sur le pot se reflète particulièrement sur sa face intérieure en contact quasi permanent avec lui. La face extérieure montre, elle, un réseau de sillons et de microfissures liées à la chaleur intense et au retrait de la céramique (fig. 159 et 171). L'épaisseur de la paroi atteint environ 30 mm au niveau du fond et diminue progressivement en direction du bord, où elle atteint encore au minimum 10 mm. Les fragments de paroi incurvée issus des extrémités des creusets ont une couleur jaune-orange ou gris-violet. Les fragments de creuset qui présentent une pâte gris-violet révèlent une surface extérieure plus fissurée. Cette différence de couleur est liée à l'orientation des creusets dans la chambre de fusion : le côté orienté vers le foyer présente une pâte de couleur gris-violet, en raison d'une atmosphère réductrice, tandis que le côté orienté vers l'ouvrage révèle une pâte de couleur jaune-orange influencée par une atmosphère oxydante plus riche en oxygène<sup>487</sup>.

Outre ces particularités macroscopiques, des différences structurelles apparaissent aussi au niveau du tesson. Généralement, on peut distinguer le noyau cristallin, la face intérieure en contact avec le verre fondu et la face extérieure vitrifiée. L'analyse du noyau a permis de répondre aux questions liées à la nature des matières premières, leur préparation et leur transformation au cours de la cuisson, puis de l'utilisation. L'étude des surfaces intérieure et extérieure a fourni des informations au sujet

de l'interaction tesson-verre et tesson-gaz de combustion.

Les résultats archéométriques<sup>488</sup> ont démontré que les creusets et les briques réfractaires ont été réalisés dans la même terre argileuse (voir chap. 5.7.6). Les différences observées entre les creusets et les échantillons de réfractaire sont minimales, indiquant que la matière première a été considérée empiriquement comme valable pour la réalisation tant des briques que des creusets. Il s'agit d'un sable argileux composé d'environ 80 % poids de quartz et 20 % poids de kaolinite. Cette composition « naturelle » réduit au minimum les problèmes de dilatation thermique et fournit une bonne stabilité aux objets façonnés en augmentant leur résistance mécanique. Comme le point de ramollissement de la pâte se situait environ à 1600° C<sup>489</sup>, les éléments de réfractaire présentaient une excellente stabilité même en étant exposés à des températures voisines de 1500° C. Un faible taux de fer constitue une caractéristique importante pour les argiles réfractaires employées en verrerie, parce que la présence de quelques pourcents seulement d'oxydes de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dans la pâte des creusets pouvait compromettre la couleur du verre.

Par ailleurs, le corps céramique des creusets du Pâturage de l'Envers n'a révélé aucune présence ni pétrographique ni chimique de fragments de pots et/ou de réfractaire recyclés sous forme de chamotte<sup>490</sup>. La forte fragmentation des tessons observée sur le site pourrait s'expliquer soit par un éclatement consécutif à un refroidissement brutal qui aurait engendré une microfissuration intense des récipients, soit par une volonté de récupération des restes de verre par les souffleurs. La première interprétation paraît plus vraisemblable, ce d'autant que les verriers disposaient de suffisamment de groisil « propre » issu des débris mêmes de leur production.

Les différences chromatiques observées dans la pâte céramique découlent de l'atmosphère et de la position du creuset dans la chambre de fusion. Elles suggèrent aussi une exposition prolongée, sans modification de position, seule capable d'engendrer un changement de l'état d'oxydation du fer en fonction de la fugacité locale de l'oxygène. Ainsi, la coloration de la pâte du creuset a dû se produire avant la vitrification extérieure, alors que la po-

487 Eramo 2006a, 445.

488 Eramo 2006d, 192-196.

489 Aramaki/Roy 1962, 231.

490 Eramo 2006a, 443.

rosité de la céramique était encore ouverte. En outre, la vitrification de la pâte des creusets a dû se produire avant l'introduction du récipient dans le four de fusion, comme cela apparaît dans la zone de contact entre le verre fondu et la surface vitrifiée. La vitrification de la surface s'est probablement produite à une température supérieure à 1450° C, avec l'aide de d'hydroxyde de potassium (KOH) dispersé par les gaz de combustion<sup>491</sup>. Pour atteindre de telles températures, un four céramique est insuffisant. De plus, pour éviter l'explosion des pots pendant leur utilisation, il fallait qu'ils soient maintenus à des températures supérieures à 1000° C pour empêcher la transformation polymorphique de quartz  $\beta$  en quartz  $\alpha$ . Une cuisson intégrale des creusets dans le four de fusion aurait provoqué la fracture des pots en raison du gradient thermique élevé. Ainsi, doit-on envisager une pré-cuisson des récipients (attrempage, voir ci-dessus) dans un four annexe, à des températures situées entre 800 et 1000° C, avant leur introduction dans le four de fusion où se déroulait leur cuisson finale. Ensuite seulement, les verriers introduisaient la composition à fondre.

#### 5.8.2.6 Comparaison avec Court, Sous les Roches

Une sélection de 53 échantillons de creusets de toutes tailles provenant du site de Sous les Roches<sup>492</sup> a fait l'objet d'une étude archéométrique à des fins comparatives. D'un point de vue macroscopique, les tessons présentent des caractéristiques similaires à celles des creusets du Pâturage de l'Envers. Parmi les tessons, 50 appartiennent à de grands creusets et 3 à de petits.

La couleur de la pâte est typiquement grise pour tous les tessons de fond, mais révèle une plus grande variabilité pour les fragments de paroi et de bord variant du jaune au violet. Les épaisseurs et les microstructures des tessons sont tout à fait superposables à celles observées au Pâturage de l'Envers. Toutefois, les tessons ayant une pâte zonée sont plus fréquents. Sur les 53 fragments, 35 présentent du verre collé sur la face intérieure ou extérieure; dans quatre cas du sable non fondu apparaît sur la face intérieure à proximité du bord (fig. 166 et 175). Sur la face extérieure de cinq tessons, des traces

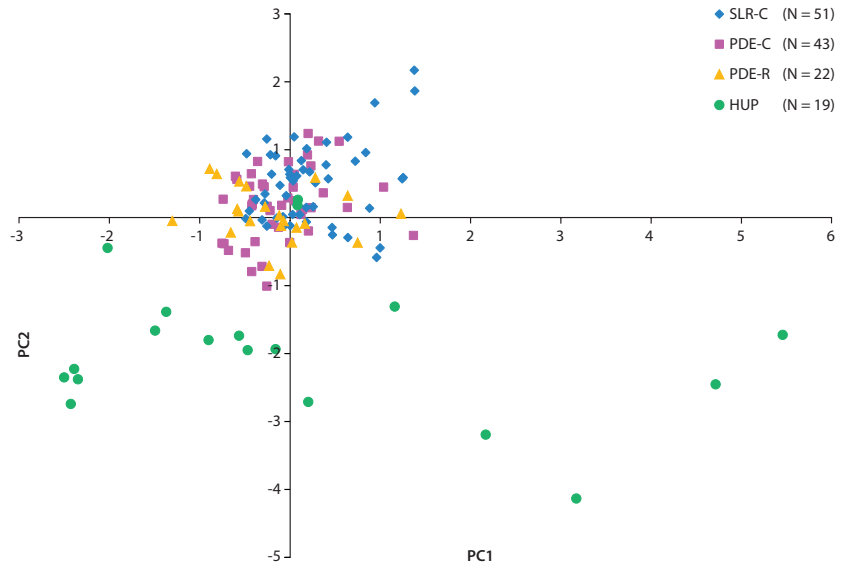


Fig. 176 : Distribution des deux composants principaux PC1 et PC2 (51,41 % de la variance totale) en tenant compte des variables chimiques et granulométriques de tous les réfractaires et toutes les terres réfractaires. Abréviations : SLR-C = Sous les Roches, creusets ; PDE-C = Pâturage de l'Envers, creusets ; PDE-R = Pâturage de l'Envers, réfractaires ; HUP = Huppersand (sable argileux).

provenant probablement d'outils utilisés pour la manutention des pots au sein de la chambre de fusion, étaient perceptibles.

L'analyse pétrographique a relevé des inclusions non plastiques et des microstructures similaires à celles du Pâturage de l'Envers. En appliquant l'analyse des composants principaux (PCA) à une sélection de variables chimiques et granulométriques ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{tot}}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $2\phi$ ,  $3\phi$ ,  $4\phi$ ,  $>4\phi$ ) des creusets de Sous les Roches, des creusets et réfractaires du Pâturage de l'Envers et des échantillons de sable argileux du Chaluet<sup>493</sup>, on observe une superposition des points compositionnels des matériaux archéologiques avec deux sable argileux seulement (fig. 176). Il s'agit des échantillons ER125 (Court, Sur Frête) et ER251 (Monible, Sous ce Mont). Bien que les données archéométriques du gisement de Hupper de Court, Sur Frête, offrent une grande similitude avec celles obtenues sur les réfractaires de Sous les Roches et Pâturage de l'Envers, les données historiques et archéologiques permettent de réfuter l'idée de l'exploitation de ce gisement par ces deux verreries (voir chap. 2.1.1). La composition minéralogique des creusets de Sous les Roches est similaire à celle des creusets du Pâturage de l'Envers; toutes deux présentent les mêmes phases cristallines : quartz, mullite,

491 Eramo 2006a, 446-450.

492 Voir note 195. Matériel conservé à Berne, dans les dépôts du Service archéologique cantonal. Gerber 2010, 28, 34-36.

493 Eramo 2006d, 188-190.

cristobalite et tridymite. Les températures d'exposition maximales sont estimées entre 1350 et 1500° C. Dans le cas de Sous les Roches également, une précuisson dans un four annexe suivie d'une cuisson totale dans le four de fusion est supposée et explique les différences de couleurs et de microstructures observées dans la matrice. La grande homogénéité des caractéristiques mises en évidence entre les creusets de ces deux sites révèle une continuité historique et technologique à la fois au niveau de l'approvisionnement en matières premières et de l'outil de production.

### 5.8.3 Petits creusets

Laetitia Kaiser

Les seize petits creusets retrouvés sur le site ont été réalisés en argile réfractaire beige-jaune, identique à celle utilisée pour les grands pots. Aucun exemplaire entier n'a été mis au jour et la majorité des pièces sont très fragmentaires; elles se réduisent parfois à un simple tesson. Cependant, les exemplaires cat. 13-16 (fig. 177), mieux conservés, fournissent des in-

Fig. 177 : Court, Pâturage de l'Envers. Petits creusets. Face intérieure des exemplaires cat. 13, 14 et 16 et face extérieure du cat. 14. Ech. 1:3.

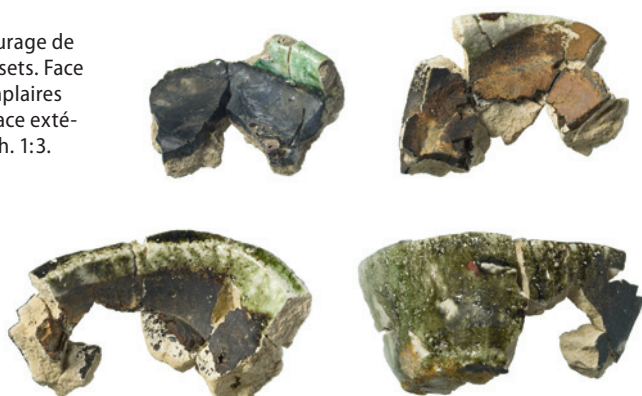
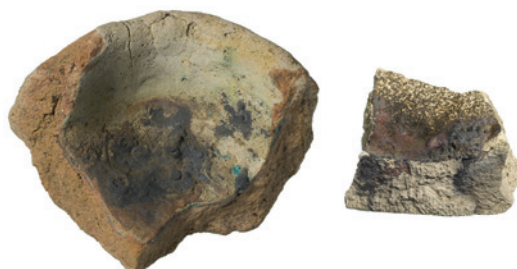


Fig. 178 : Court, Pâturage de l'Envers. Détail de dépôts d'oxyde métallique sur les deux petits creusets cat. 15 et 19. Ech. 1:2.



dications quant à leur forme: elle a aussi tendance à être ovale. On constate que ces petits pots sont relativement irréguliers; il semble qu'ils aient été fabriqués à la main, assez rapidement. Le creuset cat. 15 fait exception: il semble être rond et sa pâte apparaît également différente. De couleur rouge, elle est riche en oxyde de fer et en silice. A priori, l'argile utilisée pourrait provenir d'un gisement similaire à ceux exploités pour la fabrication des briques en terre cuite (voir chap. 5.7.2.1). Malgré le caractère fragmentaire des creusets formant ce corpus, quelques dimensions ont pu être mesurées. La hauteur des pots varie entre 38 et 62 mm. L'épaisseur du bord est comprise entre 8 et 20 mm et celle du fond entre 5 et 26 mm. Les parois intérieure et extérieure des récipients montrent une surface vitrifiée crème, verte ou brune. Le cat. 15 est peu vitrifié; sa surface présente un début de grésage. L'observation des pots révèle des matrices vacuolées et feuilletées, signes d'une préparation peu soignée. L'utilisation ponctuelle de ces creusets expliquerait cette exécution rapide. Il semble que ces récipients aient été réalisés sans moule. Les creusets conservent, au fond, des résidus de verre bleu, vert, rouge ou encore violet. Toutefois, les cat. 15 et 19 présentent des dépôts d'oxyde métallique non identifiés (fig. 178).

Comme mentionné précédemment (voir chap. 5.7.1.3), on suppose que ces creusets renfermaient du verre utilisé pour effectuer des décors sur certaines pièces. On remarque que tous les individus contiennent des restes de verre sur le fond ou présentent des coulures le long des parois (fig. 179). Cette hypothèse est confirmée par Danièle Foy, qui l'a observé sur des creusets médiévaux: « Tous ces petits creusets étaient réservés à un même usage. L'observation de la couche de verre restée sur les parois et sur le fond, montre qu'il s'agit presque à chaque fois de verre coloré. [...] le verre bleu foncé ou plus rarement rouge, que l'on trouve à l'intérieur de ces réfractaires, montre bien qu'ils étaient utilisés pour la fusion d'un mélange contenant des oxydes pour colorer le verre »<sup>494</sup>.

La question de l'emplacement de ces petits récipients n'est pas définie. On ne peut raisonnablement pas imaginer qu'ils étaient placés sur la banquette. Ils se trouvaient peut-être dans un autre four, où la température était plus





Fig. 179 : Court, Pâturage de l'Envers. Petits creusets. Restes de verre bleu sur le cat. 22 et de verres rouge, jaune et blanc sur l'ind. 55. Ech. 1:1.

faible que celle dans le four de fusion. Toutefois, il semble que la manière la plus efficace était de « sacrifier » un grand creuset dans le four et d'y placer les petits creusets, calés au moyen d'une brique. On constate que ces petits pots ont subi les effets de la chaleur. Les cat. 16, 21 et l'ind. 55 dévoilent des vitrifications internes alors que le cat. 19 comporte une fissure de part en part vitrifiée. Le fond du creuset, fragilisé, s'est fissuré et une partie du contenu a coulé dans la fissure. Quant à leur répartition (fig. 180), 63 % des individus proviennent de la halle, 25 % du bâtiment 2 et 12 % des zones de rejet (A8 et A13). Les exemplaires les mieux conservés<sup>495</sup> proviennent de l'habitation 2 ; il est possible que ces pièces aient été remployées.

#### 5.8.4 Emploi et durée de vie des creusets

Laetitia Kaiser et Christophe Gerber

Dans une verrerie, les creusets sont aussi importants que le four de fusion. Les récipients doivent avoir un comportement réfractaire qui leur permet de résister aux hautes températures ainsi qu'une résistance thermique. Aussi, « un mauvais choix des argiles, une épuration imparfaite, un séchage maladroit, une cuisson mal menée, et c'était le risque de fissuration, vite catastrophique lorsque le pot était rempli de matière en fusion. Le verre liquide se répandait alors sur le siège et dans le foyer, causait des dégâts au four et faisait perdre au moins une journée de travail à l'ensemble des verriers »<sup>496</sup>. Les pots, ronds ou ovales, peuvent être ouverts ou couverts, comme par exemple pour la fabrication du cristal (fig. 181). Leur embouchure est tournée vers l'ouvreur et l'on

secteur	zone	quantité
A	2	1
	4.3	4
	4.4	1
	5	1
	8	1
	9	3
	13	1
	habitation 2	4
C		
total		16

Fig. 180 : Court, Pâturage de l'Envers. Répartition des 16 petits creusets individualisés par secteur et zone.

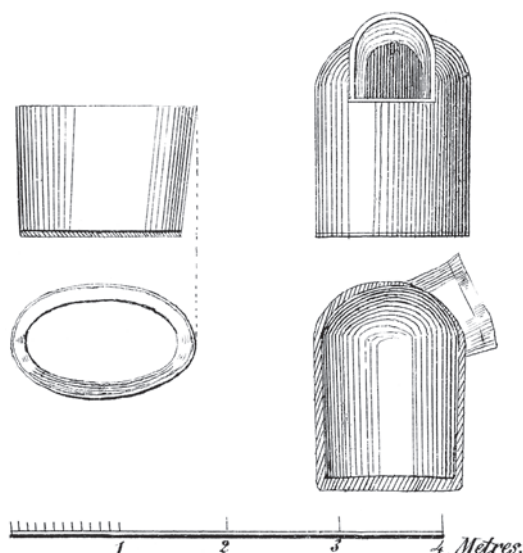


Fig. 181 : Exemples de creusets ovale et couvert. D'après Leng 1835, pl. VI.

y enfourne la composition qui est, de la sorte, protégée des impuretés qui pourraient voler dans le four ou suinter de la voûte. Les creusets ovales présentent certains avantages par rapport aux récipients ronds. En effet, il est possible de disposer un plus grand nombre de pots sur les banquettes. De plus, la chaleur peut circuler de manière optimale entre les creusets.

<sup>495</sup> Cat. 13-15.

<sup>496</sup> Michel 1989, 223.

Cependant, les pots ronds offrent la possibilité d'être tournés si le côté exposé au feu présente des signes de faiblesse ; ce qui est plus difficile, voire impossible, pour les formes ovales. En définitive, ce n'est pas tant le contenant qui est déterminant, mais plutôt le volume de matière disponible pour une journée de travail : le verrier qui souffle des bouteilles de vin utilise une quantité de verre nettement plus importante qu'un souffleur chargé de produire des verres à pied, par exemple !

Reste à élucider la question de la durée de vie de ces creusets, qui demeure intimement liée à celle d'une campagne. Malheureusement, aucune source écrite se référant à notre verrerie n'en fait mention. En revanche, la littérature nous donne quelques informations à ce sujet. Germaine Rose-Villequey, dans son ouvrage *Verre et verriers de Lorraine*, nous apprend qu'il y avait environ 180 jours ouvrables par an si l'on déduit les fêtes, les dimanches et la morte saison durant laquelle les artisans s'occupaient de l'entretien des fours<sup>497</sup> ; une campagne durerait donc environ six mois. Maus et Michel mentionnent également une durée d'utilisation de six mois<sup>498</sup>. En 1649, à Walkersbach (DE), le four fonctionnait un peu moins longtemps, entre 18 et 20 semaines<sup>499</sup>.

Chez Pélégot, la campagne de travail est plus longue. Il indique que les verriers effectuent entre 245 et 250 fontes par année, soit environ huit mois de travail, mais il fait sans doute référence aux manufactures qui travaillent selon des méthodes productivistes en vogue dès la seconde moitié du 19<sup>e</sup> siècle. Fernand Schwab mentionne qu'au 18<sup>e</sup> siècle, à la verrerie de Biaufond, on préconisait une pause de quatre à cinq semaines par année, ce qui apparaît extrêmement peu : « En sixième lieu que l'on éteindra point ou fera cesser le feu dans aucun four ou place pendant qu'il sera bon est solide, et que généralement les-dits fours ne chaumeront autant que possible que pour le temps de quatre cinq semaines pendant l'année (*sic*) »<sup>500</sup>.

Dans le cas de notre verrerie, située à l'Envers, à 820 m d'altitude, on imagine que les verriers commençaient leur ouvrage au début du printemps (mars ou avril) et travaillaient jusqu'à la Saint-Martin (11 novembre). Il s'agit, en effet, de l'époque de l'année où les amodiataires, les locataires, les paysans et autres

artisans payaient leurs baux et leurs impôts. Traditionnellement, il s'agit de la fin des travaux agricoles. La pause hivernale aurait donc pu servir à la réfection des fours. Mais il est évident que ces étapes de maintenance dépendaient de l'état du four : s'il se dégradait plus vite, la campagne était interrompue à temps, afin de procéder aux travaux. Une campagne aurait donc duré environ huit mois. En l'absence de document écrit, la durée de vie des creusets utilisés au Pâturage de l'Envers est difficile à estimer. Claude Pris, pour la verrerie de Saint-Gobain, allègue que « la durée d'un pot au XVIII<sup>e</sup> siècle était évaluée à environ 85 jours »<sup>501</sup>. Michel, quant à lui, mentionne une existence plus courte : « Leur longévité dans le four était, au maximum, d'un mois. En fait, elle dépendait non seulement de la qualité des terres et du soin mis à les confectionner, mais tout autant de la manière dont ils étaient utilisés »<sup>502</sup>.

Sur notre site, les 2240 kg de creusets collectés représentent un minimum de 172 individus. Comme une partie des débris est restée enfouie sur place, notamment dans le crassier principal qui n'a pas été exploité dans sa totalité, le nombre réel de récipients utilisés doit être bien supérieur. Le contrat d'amodiation de 1699 limite l'exploitation de la verrerie à quinze ans. Mais les livraisons de terre pour la construction des fours ne paraissent intervenir qu'en 1701/02 (voir chap. 2.1.1), ce qui suppose que les verriers n'ont vraisemblablement pu démarrer leur production au Pâturage de l'Envers qu'à partir de 1703... Qu'à cela ne tienne, on peut estimer à douze ou quatorze le nombre minimal de creusets utilisés par année<sup>503</sup>. En admettant que deux tiers au moins des récipients aient été retrouvés, on pourrait estimer à environ 260 le nombre total de creusets utilisés durant ce laps de temps, soit 17 par année. Ce chiffre relativement bas tendrait à démontrer la qualité de l'argile réfractaire utilisée et une durée de vie plutôt longue de ces creusets.

Les pots du Pâturage de l'Envers furent réalisés dans une argile locale de qualité, riche en kaolin et bien adaptée à la verrerie. Les dimensions mesurées sur différents individus, quoique proches, ne laissent pas transparaître l'usage de moules dans leur confection, mais plutôt un dressage manuel au moyen de pâtons. Leur forme ovale, largement diffusée

497 Rose-Villequey 1970, 173.

498 Maus/Jenisch 1998, 353 ; Michel 1989, 214.

499 Lang 2001, 178.

500 Schwab (s.d.), 48 reprenant le Règlement interne du 25 septembre 1753 présenté au procès du 1<sup>er</sup> juin 1759. AAEB Procédures civiles Franches-Montagnes 15 juin 1759 : liasse contenant un règlement verrier de Biaufond daté du 25 septembre 1753. Voir aussi Michel 1999, 240, note 20.

501 Pris 1975, 452.

502 Michel 1989, 224.

503 Nombre minimal de creusets estimé (172) divisé par le nombre d'années (12 ou 15 ans selon l'année effective du démarrage des fours), soit 11,4 ou 14,3 pots/an.

dans l'artisanat verrier postmédiéval, autorise un positionnement en rangs serrés dans le four de fusion. Leur taille réduite et leur capacité de douze litres environ étaient adaptées à une production quotidienne de menu verre, c'est-à-dire de la petite gobeletterie. A mesure que les parois s'affinaient, rongées qu'elles étaient par la chaleur et le verre en fusion, les creusets se fragilisaient. L'art du verrier résidait aussi dans la décision de remplacer le pot au moment opportun pour éviter un éclatement dans le four qui ruinerait non seulement son travail, mais aussi celui de ses congénères.

## 5.9 La céramique à recuire<sup>504</sup>

Jonathan Frey

### 5.9.1 Introduction

La céramique technique joue un rôle important dans la production et la transformation du verre pré-moderne. Les creusets dans lesquels le mélange de verre était fondu constituent un ensemble de récipients désormais bien étudié<sup>505</sup>. Des moules en céramique étaient également souvent employés pour le façonnage<sup>506</sup>. La céramique technique était encore utilisée pour le refroidissement des verres fabriqués. Jusqu'à présent, bien peu d'attention a été prêtée à cette céramique dite « à recuire » . Il sera donc tenté ci-dessous d'expliquer sa fonction à l'aide des sources iconographiques et écrites principales. Le matériel archéologique et les études disponibles pour cette époque ont été rassemblés à titre de comparaison. L'inventaire de la céramique à recuire mise au jour sur le site de la verrerie du Pâturage de l'Envers, sa répartition sur les secteurs fouillés et les principales formes de ces récipients seront ici présentés. En conclusion, des questions permettant d'ouvrir des perspectives de recherche sur le sujet, dont les réponses constitueront l'un des objectifs du volume 3, seront formulées<sup>508</sup>.

### 5.9.2 Etat de la question

#### 5.9.2.1 Sources iconographiques et écrites

« On y [coffres en terre cuite] met les objets de verre déjà soufflés, pour qu'ils soient refroidis lentement, sinon ils se briseraient »<sup>509</sup>. Cette citation issue du traité *De re metallica* de Georgius Agricola précise bien la fonction de la céramique à recuire, de même que la nécessité de laisser le verre refroidir lentement et soigneusement après qu'il ait été soufflé au moyen d'une canne. Le contact du verre incandescent avec des corps froids comme les outils ne pose pas de problème, puisque aucune tension interne ne s'est encore formée dans ce dernier. Sitôt que le verre encore très chaud devient solide, son contact avec des objets froids peut par contre conduire à son éclatement<sup>510</sup>. C'est pourquoi le verre fabriqué de nos jours doit être, dans un premier temps, maintenu au chaud à une température constante relativement haute, afin d'en éliminer les tensions internes. La température est ensuite graduellement réduite à un niveau qui demeure encore élevé. Dans une troisième phase, le verre est refroidi de manière assez rapide jusqu'à température ambiante<sup>511</sup>.

D'après les rares sources iconographiques conservées, les verres auraient été refroidis dans l'arche sans la protection thermique offerte par les récipients susmentionnés par Agricola jusqu'à la fin du 15<sup>e</sup> siècle<sup>512</sup>. L'arche se trouvait souvent au-dessus du four de fusion et était reliée à ce dernier par un conduit, de manière à ce que la température n'y soit réduite que dans une proportion limitée. L'effet de la chaleur sur les verres était diminué en les éloignant graduellement du conduit vers une zone plus froide. La façon dont les verres pouvaient être refroidis jusqu'à température ambiante par ce procédé reste incertaine. On recourait peut-être à une arche à recuire supplémentaire qu'on laissait refroidir jusqu'à température ambiante<sup>513</sup>.

Au début du 15<sup>e</sup> siècle, la représentation tirée des *Voyages* de Jean de Mandeville montre comment un ouvrier retire des verres de l'arche à recuire et les dépose dans un grand pot à large ouverture. Selon plusieurs auteurs<sup>514</sup>, ce pot servait à la cuisson à l'extérieur du four et protégeait le verre du froid, ce qui pouvait présenter

504 La contribution de Jonathan Frey a été publiée en allemand (voir Frey 2011, 205-215) ; son adaptation française est due à Lara Tremblay, SAB.

505 Kurzmann 2004, 159-160 et 186.

506 Kurzmann 2004, 171-172 ; ex. dans Franze 2008, 151, fig. 6 et Rempel 2008, 196, fig. 6.

507 Tarcsay 2009, 239.

508 Le traitement de la céramique domestique et à recuire fait l'objet d'une thèse de doctorat par l'auteur. Voir note 17. Sa publication constituera le volume 3 de la série Court, Pâturage de l'Envers. Gerber 2010, 24.

509 Agricola 1556/1992, 475.

510 Kurzmann 2004, 190.

511 Kurzmann 2004, 192.

512 Cette déclaration repose sur la représentation d'un four à verre dans l'une des copies de l'ouvrage *De universo* de Raban Maur datée du 11<sup>e</sup> s. (Abbaye du Mont-Cassin, Codex 132) et sur deux représentations tirées de manuscrits de la fin du 15<sup>e</sup> s. provenant de la bibliothèque vaticane (Chigi F. VIII 158, fol. 93v et Chigi F. VIII 188 fol. 191) ; voir Charleston 1978, 11 et 13 (fig. 1-3) ; Kurzmann 2004, 80 et 108.

513 Kurzmann 2004, 144 et 192-193.

514 Kurzmann 2004, 93 ; Frommer/Kottmann 2004, 228 ; Tarcsay 2009, 240.

essentiellement deux avantages. D'une part, il n'était ainsi pas nécessaire de laisser refroidir complètement l'arche à recuire et de l'autre, ce transfert des verres partiellement refroidis dans les pots à recuire faisait de la place pour ceux venant tout juste d'être façonnés, ce qui augmentait la capacité de l'arche.

Au premier quart du 16<sup>e</sup> siècle, la description d'un four italien par le prêtre suédois Peder Månsson mentionne bien la recuisson des verres dans l'arche reposant au-dessus du four de fusion, dans sa moitié supérieure, mais pas l'emploi de la céramique à recuire<sup>515</sup>. On note également l'absence de tout indice concernant les récipients de recuisson dans le traité *De Pirotechnia* de Biringuccio, imprimé en 1540<sup>516</sup>.

Georgius Agricola décrit, lorsqu'il traite des installations d'une verrerie à trois fours, l'emploi de récipients de recuisson en céramique de type coffre, d'environ trois pieds de long, un pied et demi de haut et un pied de large. D'après la citation mentionnée plus haut, ils servaient à protéger le verre d'une chaleur excessive et permettaient un refroidissement graduel. Les récipients de recuisson se trouvent dans la chambre supérieure de l'arche rectangulaire construite contre le four de travail et y sont progressivement remplis de verre<sup>517</sup>. Dès qu'un des récipients allongés est rempli, il est transféré avec une large barre de fer dans une des chambres inférieures de l'arche à recuire<sup>518</sup>.

On trouve une autre description de l'emploi de la céramique à recuire dans le récit de Gottfried Wehen, daté de 1649 et portant sur la verrerie de Walkersbach près de Stuttgart (DE)<sup>519</sup>. Cette description détaillée se rapporte au refroidissement de verres à boire, parmi lesquels se trouvent potentiellement des coupes filiformes<sup>520</sup>. Les verres sont portés par deux gamins dans l'arche à recuire et posés dans la cendre chaude. Après avoir déposé une vingtaine de verres les uns près des autres, ils sont placés dans des pots à recuire chauffés, désignés sous le nom de « irdene Haffen » dans le texte original. Les pots à recuire sont par la suite immédiatement retirés du four et déposés au sol dans une position horizontale, puis scellés au moyen d'une dalle de pierre placée devant l'ouverture à la verticale. Le verre est ensuite refroidi environ une demi-heure ou plus dans les pots à recuire, puis il en est extrait<sup>521</sup>. De grands pots à l'horizontale sont également

visibles sur le verre émaillé dit « Preussler-Humpen », daté de 1680<sup>522</sup>. L'arche à recuire y est fermée par une porte en fer qui permet de régler la température. Le processus de refroidissement décrit pour Walkersbach (DE) se divise en une première phase à l'intérieur de l'arche à recuire et une seconde à l'extérieur, au cours de laquelle le verre est amené à température ambiante dans les pots. Cette séquence correspond en principe au processus de recuisson médiéval, tel que déduit de la représentation contenue dans le livre des *Voyages* de Jean de Mandeville.

Un emploi légèrement différent de la céramique à recuire peut encore être décelé sur une illustration de la *Topographia Windhagiana*, dont la première édition remonte à 1656; elle présente une vue intérieure de la halle de production de la verrerie de Reichenau II am Freiwald (AT)<sup>523</sup>. Sur le côté le plus long de l'arche à recuire, mesurant environ trois mètres, on trouve deux ouvertures rectangulaires dans lesquelles des récipients servant à la recuisson sont remplis de verres fabriqués (fig. 182). Un ouvrier semble remplir ces derniers avec des verres<sup>524</sup>. Puisque l'arche à recuire est chauffée conjointement avec le four de fusion qui lui est accolé et que sa température interne baisse par conséquent vers la fin, on peut supposer que des températures de hauteur différente règnent dans les zones respectives des deux ouvertures. Les récipients de recuisson servaient donc à déplacer plus de verres en même temps à l'intérieur de l'arche. Les verres parvenaient ainsi à une température relativement inférieure et étaient recuits jusqu'à température ambiante.

Un processus de refroidissement comparable en principe est décrit par Merrett dans son traité *The Art of Glass* paru en 1662. Les verres produits y sont d'abord placés dans une arche à recuire située au-dessus du four de fusion, puis déplacés après avoir passé un certain temps dans des contenants en fer appelés « fraches ». Les contenants en fer sont placés dans l'arche à recuire en forme de tunnel et déplacés successivement en direction de l'extrémité la moins chaude, nommée « sarosel »<sup>525</sup>.

L'utilisation des pots à recuire semble s'être poursuivie en continu au 18<sup>e</sup> siècle, comme en témoigne la description des verreries « blanches » par Krünitz, dans le 18<sup>e</sup> vo-

515 Charleston 1978, 13.

516 Biringuccio 1540/1977, fol. 43v; Johannsen 1925, 155; Kurzmann 2004, 110-111.

517 Agricola 1556/1992, 475-478.

518 Agricola 1556/1992, 480; Kurzmann 2004, 144.

519 Lang 2001, 177; Kurzmann 2004, 144.

520 Des cives ont aussi été fabriquées à l'un des sept ouvreaux. La source ne précise pas s'il s'agit de verre de forêt vert ou de verre incolore. Lang 2001, 178.

521 STAL B 44, Ellwangen, Bü 1120/15, cité d'après Lang 2001, 177.

522 Kunstgewerbemuseum Prag Inv.-Nr. 9918, cité d'après Tarcsey 2009, 240; Charleston 1978, 28-29; Žegklitz 2007, 162, fig. 26.

523 Tarcsey 2009, 23 et 50-51.

524 Tarcsey 2009, 240.

525 Merrett 1662/2006, 301-302; Charleston 1978, 17 et 18.



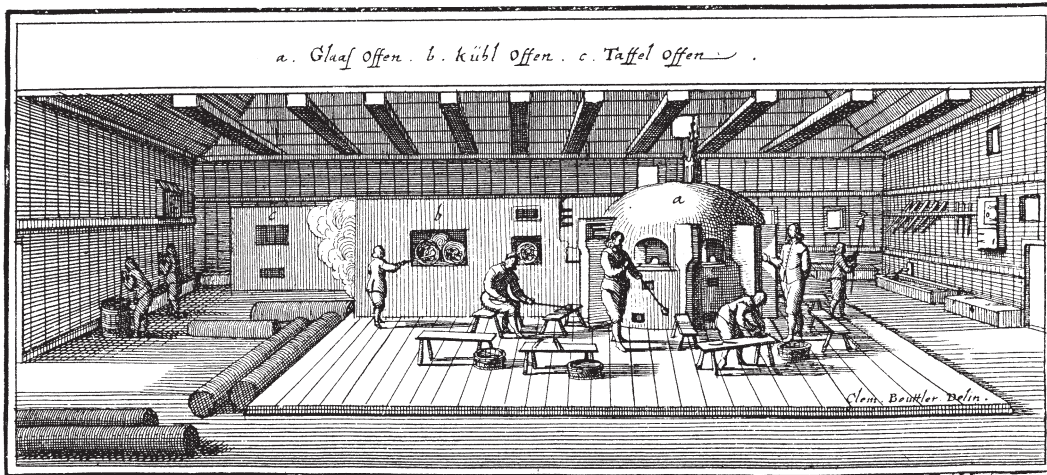


Fig. 182 : Vue à l'intérieur de la verrerie bohémienne de Reichenau II. Au centre de l'image, se trouve l'arche à recuire allongée percée d'ouvertures rectangulaires qui permettent d'accéder aux pots à recuire. Merian 1656, Pl. 5.

lume de l'*Oekonomischen Encyklopaedie* de 1779. Les verres étaient placés dans les pots à recuire qui se trouvaient déjà dans l'arche et y étaient ensuite recuits quelques heures. La cuisson des verres dans des pots à l'horizontale placés à l'intérieur de l'arche à recuire a pu être comprise grâce à l'archéologie expérimentale, par la reconstruction du four verrier médiéval de Moldava (CZ), dans les Monts métallifères tchèques<sup>526</sup>. Après la fin de cette phase de refroidissement, les verriers prennent « du four un pot après l'autre avec de grosses pinces, ferment chaque pot avec un couvercle de fer et le posent renversé dans un billot percé près du four »<sup>527</sup>. Comme à Walkersbach (DE), les pots à recuire dans la description de Krünitz sont fermés afin que la chaleur des verres ne se dissipe pas trop rapidement. La position exacte des récipients et la fonction du billot demeurent toutefois ambiguës<sup>528</sup>.

### 5.9.2.2 Sources archéologiques

Le riche potentiel en sources iconographiques et écrites, à tout le moins pour le début de l'époque moderne, contraste avec le faible nombre de témoins matériels archéologiques et de recherches sur la céramique à recuire<sup>529</sup>. Même dans les ouvrages récents de type manuel, on note l'absence de travaux de synthèse sur l'apparition et l'utilisation de cette dernière<sup>530</sup>. Pour la céramique à recuire du Moyen Âge, on peut mentionner le matériel provenant des verreries saxonnes de Pocau im Erzgebirge (CZ) et de Glaswasen im Schönbuch (DE), qui datent toutes deux du 15<sup>e</sup> siècle<sup>531</sup>. Pour la verrerie de Glaswasen, un

groupe de pots à lèvres en bandeau, caractérisé par un type de pâte distinct, a pu être qualifié de récipient de cuisson en fonction de leur taille, des traces de chauffe sur leur panse extérieure et de leur relation avec du verre creux<sup>532</sup>. Grâce à l'analyse détaillée de la répartition des trouvailles sur le site de la verrerie, l'intérêt de ces récipients pour la compréhension du processus de cuisson et, par conséquent, du processus de production dans son ensemble a pu être mis en évidence<sup>533</sup>. Une reconstitution complète du profil des récipients n'a toutefois pas été possible en raison de la trop grande fragmentation du matériel<sup>534</sup>. Les perforations observées sur le fond des récipients n'ont pas été étudiées de plus près<sup>535</sup>.

Des exemples de récipients à recuire de l'époque moderne ont été retrouvés sur les sites verriers de Broumy (CZ, 1599-fin du 17<sup>e</sup> siècle), Weinsberg (DE), Reichenau II am Freiwald (AT, 1601-1686), Flühli-Südel (LU, 1723-ca.1760) et Liebenau, Bauernberg (AT, 1786/1787-1806)<sup>536</sup>. La production de céramique à recuire résistante à la chaleur est attestée pour le centre de potiers de Grossalmerode (DE)<sup>537</sup>.

Les recherches réalisées à Flühli-Südel dans le canton de Lucerne sont à classer parmi les opérations pionnières en raison de l'exhaustivité de la fouille des bâtiments de la verrerie et de la présentation des résultats. Les structures de Flühli-Südel sont d'un intérêt particulier en raison de leur similarité avec celles de Court, Pâturage de l'Envers, puisque des verriers de la Forêt-Noire ont aussi participé à la fondation de cette verrerie. La provenance commune des verriers se manifeste ainsi dans

526 Žegklitz 2007, 166.

527 Krünitz 1779, vol. 18, 622 (traduction libre d'après l'original allemand).

528 Krünitz 1779, vol. 18, 623.

529 Voir à ce sujet Tarcay 2009, 239.

530 Une brève mention se trouve par ex. dans Kurzmann 2004, 144 et 193; sous le chapitre « Werkzeuge » (Kurzmann 2004, 171-174), la céramique à recuire n'est par contre pas mentionnée.

531 Tarcay 2009, 239, note 433; Frommer/Kottmann 2004.

532 Frommer/Kottmann 2004, 228.

533 Frommer/Kottmann 2004, 231-232.

534 Frommer/Kottmann 2004, 104.

535 Frommer/Kottmann 2004, 229.

536 Pour la verrerie de Broumy, voir Žegklitz 2007, 146-149 et 166, fig. 32.2; Tarcay 2009, 240, n. 437 pour Weinsberg; Tarcay 2009, 43 et 236-246 pour Reichenau; Descœudres/Horvat/Stöckli 1985, 3 et 38-44 pour Flühli-Südel; Tarcay 2009, 239, n. 435 pour Bauernberg.

537 Stephan 1986, 64.

la disposition comparable des installations de production<sup>538</sup>. A Flühli-Südel, la céramique à recuire comprend des pots à dégraissant grossier (diamètre du grain de 1 mm) dont les tessons sont rouge tuile et le diamètre de l'ouverture est d'au moins 14 à 30 cm au maximum. D'autres pots à recuire aux parois très épaisses, fabriqués dans des moules en bois, de même que des bols aux parois abruptes ont aussi été décelés<sup>539</sup>. La reconstitution de profils complets des récipients n'a pas été possible, ni l'attribution des bords aux fonds<sup>540</sup>. Plus de la moitié des tessons présentaient des percements qui ont été interprétés comme trous d'aération. Notons que la publication de ce matériel a permis une approche concrète de la céramique à recuire et a donné une première vue d'ensemble des formes existantes, bien que le potentiel de ce témoignage n'ait été exploité qu'en partie : seule une fraction minime du matériel a été publiée, sans que le contexte des trouvailles ne soit pris en compte<sup>541</sup>.

Depuis peu, les grandes lignes d'un projet d'envergure portant sur la céramique à recuire de la verrerie de Reichenau II am Freiwald (AT) ont été dégagées. En raison de la qualité spéciale des tessons, des dimensions des pots et de l'absence de glaçure, l'assimilation de ce matériel à de la céramique à recuire est claire. Les 122 fragments appartiennent principalement à de grands pots dont les bords sont éversés, mais aussi à des bols aux bords carénés et à quelques couvercles et plats isolés. La reconstitution de profils complets de récipients n'a pas été possible en raison du degré de fragmentation<sup>542</sup>. Le manque de matériel de comparaison a complexifié la classification typologique des bords de pots, mais une conception comparable de ces derniers au niveau suprarégional, soi-disant conditionnée par leur fonction, a été observée<sup>543</sup>. Les perforations fréquemment rencontrées étaient au moins dans un cas munies d'une boucle de fil de fer<sup>544</sup>. Leur interprétation comme moyen de suspension ou de préhension a été proposée ; la faible valeur de la céramique non glaçurée rendait peu plausible un renfort préventif ou une réparation. La ville de Weitra (AT) a été suggérée comme centre de production éventuel de la céramique à recuire utilisée à Reichenau, notamment du fait que la verrerie de Sonnenschlag y a commandé, malgré une dis-

tance géographique considérable, quinze pots à recuire en 1639<sup>545</sup>.

Les témoignages archéologiques de la céramique à recuire ont permis d'identifier les objets ronds représentés sur la vue intérieure de la verrerie de Reichenau II susmentionnée comme récipients de cuisson (fig. 183)<sup>546</sup>. Des documents écrits du 19<sup>e</sup> siècle provenant du Waldviertel démontrent que les pots à recuire étaient posés dans les cendres de l'arche à recuire et qu'au 20<sup>e</sup> siècle, des contenants en tôle similaires étaient remplis de cendre chaude et de verres. L'enveloppement du verre chaud fragile dans la cendre semble judicieux, compte tenu de la surface intérieure rugueuse de la céramique à recuire de Reichenau II<sup>547</sup>. Quelques verres complets présentent un indice supplémentaire de l'utilisation de cendre chaude dans les récipients de cuisson : ils sont déformés suite à une potentielle surchauffe de l'arche à recuire et leur surface est recouverte par un résidu assimilable à de la cendre<sup>548</sup>.

### 5.9.3 Inventaire de la céramique

L'inventaire de la céramique récoltée à l'occasion des fouilles comprend – hormis les terres cuites architecturales, la céramique de poêle et les pipes à tabac – 37 317 tessons. Puisque la taille de la surface à exploiter n'a pas permis une fouille exhaustive, ce chiffre ne correspond pas à l'ensemble de la céramique laissée au sol pendant l'occupation de la verrerie et lors de son abandon<sup>549</sup>. On peut par exemple estimer que pour la halle de production située à l'ouest, une masse de rejet de 80 m<sup>3</sup> n'a pas été entièrement fouillée<sup>550</sup>. Les conditions de conservation, la perturbation des niveaux archéologiques, les méthodes de fouille et les critères de sélection des trouvailles récoltées sur le terrain constituent d'autres facteurs impliquant la perte de matériel archéologique<sup>551</sup>. Puisqu'une autre verrerie a été exploitée par les mêmes familles de verriers de 1715 à 1738 à une courte distance de moins de deux kilomètres, on peut supposer qu'une partie du mobilier domestique n'a pas été éliminé sur le site<sup>552</sup>. Cette hypothèse est toutefois remise en question par la présence d'une grande quantité de mobilier métallique montrant toutefois souvent des détériorations<sup>553</sup>.

538 Gerber 2010, 59.

539 Descœudres/Horat/Stöckli 1985, 42-44.

540 Descœudres/Horat/Stöckli 1985, 40.

541 Gerber 2010, 34 ; Descœudres/Horat/Stöckli 1985, 40-44.

542 Tarsay 2009, 236.

543 Tarsay 2009, 239.

544 Tarsay 2009, 246, fig. 192, R-K17 M2/39.

545 Tarsay 2009, 236.

546 Tarsay 2009, 51.

547 Tarsay 2009, 240.

548 La déformation des verres pourrait aussi être imputée à l'incendie de la verrerie de Reichenau en 1620/21, dont attestent des documents écrits ; voir Tarsay 2009, 190, particulièrement fig. 148.

549 Gerber 2010, 22-23.

550 Gerber 2010, 70-71.

551 Les fouilles réalisées par André Rais en 1952/53 font notamment parti des perturbations dans le secteur du four de fusion ; voir Gerber 2010, 34-35.

552 Gerber 2010, 27 et 29.

553 Voir « Le mobilier métallique » dans Gerber et al. (à paraître), vol. 4.

### 5.9.3.1 Caractérisation, identification et quantification

Le dégraissant grossier à très grossier et l'absence de glaçure sont caractéristiques de la céramique à recuire, ce qui la rend facile à distinguer de la céramique domestique, à dégraissant fin et souvent glaçurée (fig. 183). La taille moyenne des grains de la céramique à recuire à dégraissant très grossier est de 1 mm, mais on remarque régulièrement la présence de très gros grains de 5 à 6 mm de diamètre qui peuvent, dans des cas extrêmes, occuper toute la largeur de la paroi. Le dégraissant grossier est conditionné par la fonction de la céramique à recuire, puisqu'il lui confère – comme pour la céramique culinaire – la faculté de résister aux forts écarts de température dans l'arche à recuire<sup>554</sup>. La couleur au cœur des tessons est habituellement rouge pâle, parfois avec des nuances brunâtres. Les tessons de couleur orange et rouge foncé, nettement plus durs, sont beaucoup moins fréquents, tandis que ceux de couleur beige clair, également durs, demeurent très rares. Les couleurs de la surface, qui vont de la couleur du cœur correspondante au beige clair, sont également caractéristiques. En raison du fort degré de fragmentation, il est souvent difficile de dire si ces changements de couleur doivent être interprétés comme traces de production ou d'utilisation. Des marques de passage au feu locales noires, de même que des vitrifications complètes et partielles des surfaces extérieures sont toutefois clairement interprétables comme traces d'utilisation ; elles confirment le passage des récipients dans l'arche et leur identité de céramique à recuire.

Parmi l'ensemble de la céramique mise au jour (37 317 tessons), 24 192 tessons, soit un bon deux tiers, appartiennent à de la céramique à recuire ; ils se répartissent en 2324 tessons de bord (9,6 %), 3730 tessons de fond (15,6 %) et 18 140 tessons de paroi (75 %)<sup>555</sup>. Cette répartition relativise la prépondérance de la céramique à recuire par rapport à la céramique domestique. Ainsi, les tessons de bord de la céramique à recuire ne représentent que 40 % des 5871 identifiés pour l'ensemble du corpus, tandis que les tessons de fond en représentent 57,9 %. En considérant l'ensemble des tessons de paroi, la céramique à recuire domine



Fig. 183 : Court, Pâturage de l'Envers. Vue de la tranche d'un tesson de pot à recuire à bord profilé, très grossièrement dégraissé. Ech. 3:1.

avec une part de 72,5 %, ce qui peut être expliqué par la hauteur et le diamètre à l'ouverture de cette dernière. Le grand nombre de fragments de paroi de céramique à recuire conduit à première vue à sa possible surreprésentation par rapport à la céramique domestique.

### 5.9.3.2 Répartition spatiale

Tel qu'attendu, la céramique à recuire se concentre clairement dans les zones de production, soit la halle et l'espace au nord qui lui est adjacent (fig. 184). Fondés sur le nombre de tessons de bord et de fond, les pourcentages de céramique à recuire pour les secteurs de fouille situés à l'ouest, au nord et au sud du four de fusion atteignent 90 %. Dans la zone intérieure est de la halle, on retrouve un pourcentage de plus de 70 % de céramique à recuire, tandis qu'à l'extérieur, dans la vaste zone est adjacente, seule une petite quantité de cette dernière a été constatée. La céramique domestique domine autour de l'étenderie, car le mobilier domestique des habitations 2 et 3 a été rejeté dans ces zones lors de l'abandon de la verrerie. Dans les zones des bâtiments d'habitation 1, 2 et 3, conformément aux attentes, c'est surtout de la céramique domestique qui a été découverte.

### 5.9.3.3 Formes des récipients

Le spectre des formes des récipients de cuisson comprend des pots de forme fermée, des pots de forme cylindrique avec ou sans bord décroché et des plats.

Les récipients de forme fermée présentent une moitié de panse inférieure conique, une

<sup>554</sup> Boschetti-Maradi 2006, 35.

<sup>555</sup> Pour la définition de la céramique à recuire, voir Tarcsay 2009, 236 et 302 ; Hofer et al. 2010, 87, fig. 362.

595 700

Pots à recuire:  
nombre de tessons de bords et de fonds collectés

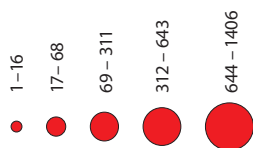


Fig. 184: Court, Pâturage de l'Envers. Répartition des tessons de pots à recuire (bords et fonds) au sein des surfaces fouillées. Ech. 1: 1000.

232 000

231 900



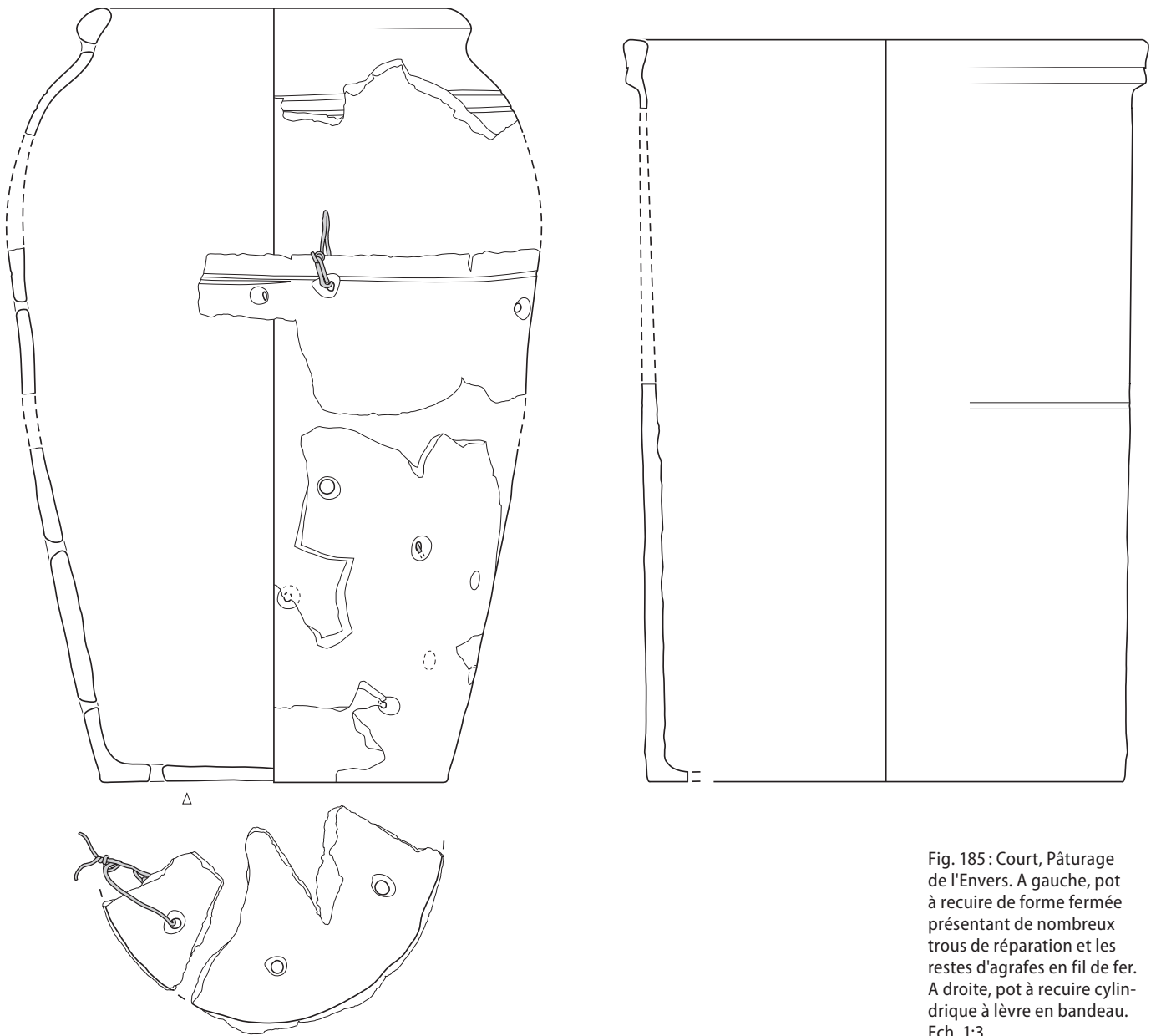


Fig. 185 : Court, Pâturage de l'Envers. A gauche, pot à recuire de forme fermée présentant de nombreux trous de réparation et les restes d'agrafes en fil de fer. A droite, pot à recuire cylindrique à lèvres en bandeau. Ech. 1:3.

épaule faiblement à moyennement prononcée et un col très court (fig. 185). Le diamètre du fond et du bord oscille entre 14 et 24 cm, avec une valeur médiane de 18 cm. La hauteur des récipients atteint approximativement 27 à 38 cm au maximum ; le diamètre maximal à l'épaule est de 30 cm. Leurs bords sont faiblement déversés.

Les récipients de forme cylindrique présentent des parois et une moitié de panse inférieure qui peuvent être faiblement évasées, droites ou légèrement rétrécies (fig. 185). Le bord se développe directement sur la paroi droite ou légèrement évasée. Le diamètre du fond et du bord mesure le plus souvent entre 24 et 36 cm, tandis que la hauteur se situe ap-

proximativement entre 50 et 60 cm. Cette forme de récipient apparaît en combinaison avec des lèvres ourlées et à bandeau concave ou non.

Les plats ne présentent aucune forme qui leur soit propre, car ils ont été produits de façon secondaire, à partir de récipients brisés dont les fragments de fond ont été limés (fig. 186). L'identification des formes de ces récipients, de même que leur quantification sont de ce fait complexifiées, puisque les bords cassés peuvent être droits même sans intervention humaine et que les traces d'utilisation y sont rares. Toutes les formes présentent des trous de réparation pratiqués pendant leur utilisation, souvent assortis de fils de fer (voir fig. 185 et 186)<sup>556</sup>.

<sup>556</sup> Gerber 2003, 68 ; Gerber 2010, 57.

Fig. 186 : Court, Pâturage de l'Envers. Plats servant à la recuisson de verres isolés, obtenus à partir de fonds de pots à recuire récupérés. Ech. 1:3.



#### 5.9.4 Perspectives de recherche

Au début de l'époque moderne, les sources iconographiques et écrites révèlent différents processus de recuisson tributaires dans une large mesure du type de fours de fusion ou de recuisson employés, ainsi que de l'époque. Puisque les sources iconographiques et écrites ne se rapportent pas directement au type de four identifié à Court, Pâturage de l'Envers, soit un four à ailettes avec des arches à recuire relativement petites, la reconstitution la plus précise possible du processus de recuisson constituera l'un des points forts de l'étude à venir. Bon nombre de questions y sont liées. Attestée par les sources écrites, l'existence de la verrerie sur à peine quinze ans soulève la question du nombre de pots à recuire utilisés et éliminés dans ce laps de temps. Le nombre minimal d'individus recensés permet non seulement de calculer leur durée de vie approximative, mais aussi la quantité nécessaire par année et par maître-verrier ; les ouvreaux du four de fusion reconstitués sont au nombre de dix selon les sources écrites et d'au moins sept selon les structures archéologiques mises au jour<sup>557</sup>. La surface au sol des deux arches à recuire archéologiquement attestée permet d'estimer, avec la taille des récipients de recuisson, combien de ces derniers pouvaient être utilisés en même temps. Sous réserve de nombreuses incertitudes, la capacité des arches à recuire peut ainsi être déterminée et comparée à la capacité de production du four de fusion, car la conte-

nance des creusets et le nombre maximal des places de travail sont également connus<sup>558</sup>. Des variables supplémentaires dans la reconstitution du processus de recuisson, telles que la distribution des individus dans la halle de production, les propriétés des formes des pots et leurs nombreuses traces d'utilisation, notamment les éraflures, usures, traces de brûlure et vitrifications des surfaces, devront être considérées. Il faudra chercher à expliquer les nombreuses réparations sur ces récipients dans le cadre de leur utilisation.

Un second axe consistera à définir la provenance, la technique de fabrication et le classement typologique de la céramique à recuire. Cette dernière présente de grandes similarités avec un groupe de céramique culinaire glaçurée de Court, Pâturage de l'Envers en termes de qualité du dégraissant, de structure des tessons et de couleur ; leur production pourrait être attribuable à Bonfol JU, notamment en raison des formes comparables des récipients<sup>559</sup>. Une analyse archéométrique de la céramique à recuire et de la céramique commune est envisagée afin de vérifier cette provenance supposée.

Le dégraissant grossier, de même que la forme et la taille des récipients de recuisson impliquaient sans doute des particularités dans la technique de fabrication, qui pourront être démontrées par des récipients sélectionnés. Une comparaison typologique de la céramique à recuire de la verrerie de Court, Sous les Roches exploitée de 1673 à 1699 avec celle de Court, Pâturage de l'Envers devrait permettre de dé-

<sup>557</sup> Gerber 2010, 28 et 52.

<sup>558</sup> Gerber 2010, 59, particulièrement fig. 52.

<sup>559</sup> Boschetti-Maradi 2006, 122 et pl. 32.

terminer dans quelle mesure les formes de bords évoluent avec le temps ou de déceler des similitudes liées à leur fonction. Des comparaisons formelles avec la céramique domestique contemporaine seront également tentées afin de pouvoir clarifier l'origine typologique des récipients de cuisson.

### 5.9.5 Données archéométriques

Giacomo Eramo

Une sélection de 19 tessons de céramiques à cuire a fait l'objet d'analyses plus poussées, visant à déterminer par le procédé de la rémanence magnétique la température d'exposition de chacun d'eux. Les travaux menés par Elena Zanella de l'Università degli Studi di Torino, Dipartimento di scienze della terra, ont fait l'objet d'un rapport, dont nous tirons ici quelques informations utiles à notre propos. L'essentiel du document devrait être intégré sous une forme à définir dans le volume 3.

Les analyses typologiques préliminaires réalisées sur différents tessons (bords, parois et fonds) ont montré l'existence de formes ouvertes et fermées (voir ci-dessus). Les fragments de pot ne présentent pas de revêtement. La majeure partie des pâtes céramiques ont une couleur orange homogène avec une bande jaunâtre, plus au moins large, sur la surface extérieure. La plupart des tessons de paroi révèlent une couche gris foncé sur leur face externe. Le tesson DS3 montre une vitrification sur la surface extérieure. La texture des pâtes céramiques est grenue au niveau des fractures fraîches. Les inclusions non plastiques (15-35 %) se composent essentiellement de grains de quartz mono- et polycristallins (diamètre max. 4,8 mm) et dans une moindre mesure de silex, de feldspath (K-feldspath > plagioclases), de concrétions ferrugineuses et de muscovite. Les fragments de roches détectés sont de types métamorphique, sédimentaire et plus rarement volcanique. Quelques grains présentent une mince couche opaque, composée d'oxydes de fer (fig. 187).

La distribution granulométrique des inclusions non plastiques est variable. On observe des tessons avec une texture unimo-

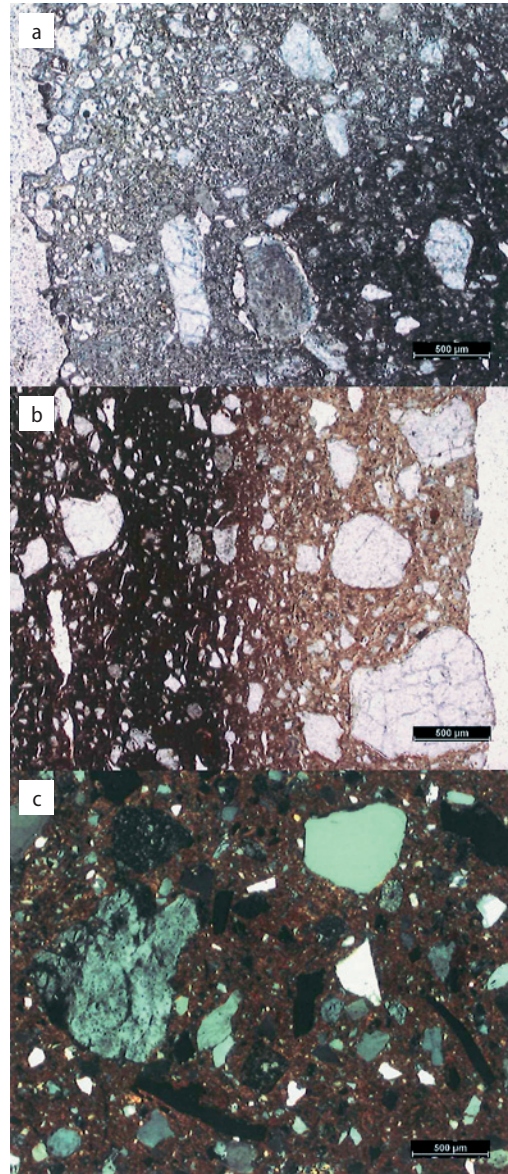


Fig. 187 : Court, Pâturage de l'Envers. Microphotographie de trois lames minces de pot à cuire : a surface vitrifiée durant son utilisation (échant. DS3); b zonation chromatique de la surface due à l'utilisation (échant. DS3); c texture de la pâte céramique (échant. ER5). Ech. 20:1.

dale ou bimodale<sup>560</sup> selon les cas; la taille des grains varie entre 0,4 et 4,4 mm. Le faciès pétrographique exprimé par l'ensemble des tessons de céramique à cuire n'est pas compatible avec le Bolus du Sidérolithique affleurant dans la vallée de Tavannes et le Chaluët (voir chap. 5.6.4). Ceci laisse supposer une provenance exogène de cette catégorie de céramique.

La comparaison des compositions pétrographiques et minéralogiques de nos céramiques et des poteries de la région de Bonfol (Jura tabulaire), produites à partir de sédiments argileux, révèle un certain nombre de similitudes. C'est plus particulièrement vrai pour les argiles bigarrées d'origine fluviatile<sup>561</sup>, mais la présence de sédiments de même faciès pétrographique dans la plaine alsacienne,

<sup>560</sup> Dans une texture unimodale, une taille de grain est prévalente; alors que dans une texture bimodale, deux tailles de grains sont prédominantes.

<sup>561</sup> Thierrin-Michael 2003, 133-136.



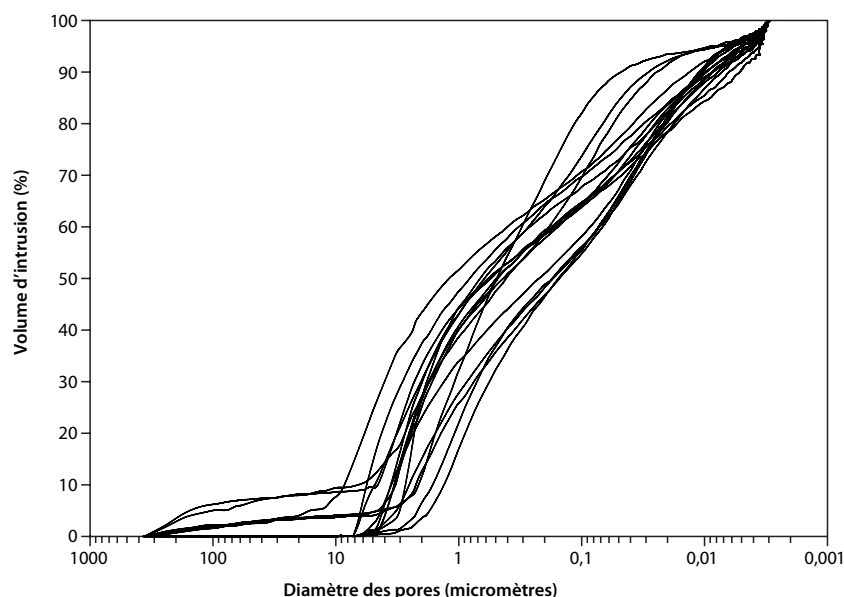


Fig. 188 : Court, Pâturage de l'Envers. Courbe cumulative du volume des pores des pots à recuire en fonction de leur taille (n = 20).

n'autorise pas d'attribuer une origine définitive à ces pots. Quant à la question de l'ajout de dégraissant dans l'argile, la variabilité granulométrique des inclusions non plastiques et l'origine fluviatile de la matière première rendent envisageable l'utilisation d'argile sableuse non traitée. Toutefois, à ce niveau de caractérisation, l'ajout de dégraissant pour les céramiques à texture bimodale ne peut pas être exclu.

L'état d'oxydation de la matrice laisse supposer, pour cette catégorie céramique, une condition de cuisson essentiellement oxydante; la tendance à la couleur jaunâtre pourrait être le fruit de leur utilisation. L'analyse minéralogique des tessons révèle une décomposition partielle des minéraux argileux et une très faible présence d'hématite dans quelques échantillons. Durant la cuisson, la pâte argileuse non calcaire de ces poteries n'a pas engendré de phase de néoformation détectable en diffraction de rayons X. Néanmoins, une esti-

mation de la température de cuisson est envisageable suite à la modification de l'ordre cristallin de l'illite/muscovite<sup>562</sup>. Les tessons ont subi une sinterisation élevée entre 900 et 1100° C, confirmée par l'analyse de porosimétrie au mercure pratiquée sur les échantillons ER1-ER20. Les résultats porosimétriques révèlent une distribution de la taille des pores dans le domaine du très fin, entre 0,01 µm et 1 µm, et des séries très comparables entre elles, d'après les courbes cumulatives (fig. 188). La porosité ouverte atteint en moyenne 24,6 %, tandis que la densité du corps céramique s'avère élevée en atteignant 2,45 g/ml<sup>563</sup>.

Les mesures de magnétisation thermorémanente ont montré que les céramiques à recuire en terre cuite ont vécu une histoire thermique plus ou moins complexe. Les mesures répétées sur deux échantillons par tesson ont parfois donné des résultats différents en raison d'une exposition thermique variable de l'objet. Les températures de Curie mesurées varient entre 480 et 580° C, ce qui montre que la magnétisation est due à des nanophases d'oxydes de fer formées pendant la cuisson de la céramique (fig. 189). Ces données sont confirmées par l'absence de pic d'hématite ou de magnétite dans les diffractogrammes. Les céramiques qui révèlent le type de magnétisation le plus simple (type B, d'après Cioni et al.<sup>564</sup>) ont subi leur dernier échauffement au-dessus de la température de Curie. Les types de magnétisation plus complexes C et D<sup>565</sup> reflètent une exposition thermique réitérée à une température située entre 150 et 450° C.

En mettant en relation le type de magnétisation, la fourchette des températures enregistrées et le type de tessons, on constate que les températures les plus élevées ont été atteintes par les tessons de fond ou de paroi. L'observation macroscopique des fonds sélectionnés a révélé des traces qui suggèrent leur réutilisation détournée en plat ou en couvercle (fig. 186). Ces échantillons ont précisément été choisis afin de vérifier cette hypothèse. Toutefois, cet usage ne paraît pas avoir affecté significativement l'exposition thermique des tessons, même si le mode de transmission de la chaleur y était différent. Les résultats démontrent que cette catégorie céramique était exposée au feu, ou plus précisément à une chaleur vive, et confirment l'hypothèse archéolo-

type	n	Tc (± 10° C)	type de fragment
B	6	160-480	P(2)+F(4)
C	7	> 540	P(3)+F(2)+B(2)
D1	1	320-340	P(1)
B-C	2	180-240 (C)	P(2)
B-D1	1	220 (D1)	F(1)
B-D3	1	420 (D3)	P(1)
C-D1	1	240 (C)+160 (D1)	P(1)

Fig. 189 : Synthèse des données magnétiques (méthode TRM). Légende : type = type de magnétisation (d'après Cioni et al. 2004) ; n = nombre d'échantillons pour chaque type de magnétisation ; Tc = température du dernier échauffement (° C) ; P = paroi ; F = fond ; B = bord.

562 Maggetti 1982, 127-128.

563 Eramo (article à paraître).

564 Cioni et al. 2004, 6-7.

565 Cioni et al. 2004, 6-7.



gique d'une affectation à la recuisson des objets en verre. L'hétérogénéité des températures enregistrées est non seulement liée à la position même qu'occupait chaque tesson sur l'objet, mais aussi à la position même du récipient dans l'arche à cuire.

Dans l'ensemble, les valeurs qui dépassent 580° C sont compatibles avec les températures

de l'ordre de 700° C admises pour la recuisson de verre calco-potassique<sup>566</sup>. En conclusion, on peut affirmer que les céramiques techniques à pâte orangée du Pâturage de l'Envers provenaient très probablement de la région jurassienne de Bonfol et qu'elles étaient destinées à contenir les objets en verre au cours de leur passage à l'arche à cuire.

<sup>566</sup> Poole/Gensamer 1949, 220-229.



## 6. Four : synthèse générale

Laetitia Kaiser, Giacomo Eramo et Christophe Gerber



## 6.1 Données archéologiques

Laetitia Kaiser

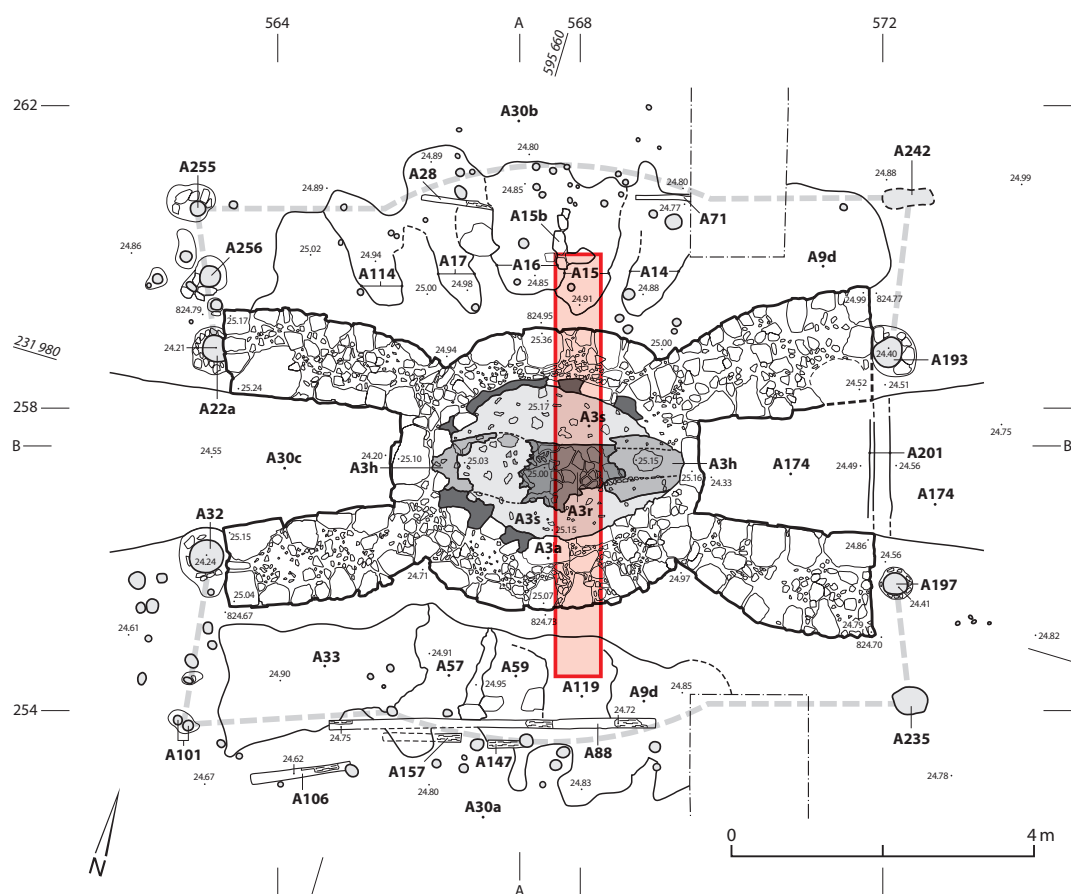
Avec les creusets, le four est l'élément primordial de la verrerie; le bon fonctionnement de l'installation dépend, entre autre, de sa capacité thermique (bonne réverbération) et de la qualité du combustible. Ce dernier paramètre est essentiel, car le bois de chauffe constitue l'une des principales dépenses des verreries. Bontemps rappelle que, « dans la construction d'un four, on doit avoir en vue de fondre la plus grande quantité de verre avec la moindre quantité de combustible; on doit donc disposer l'intérieur du four de manière à avoir le moins possible d'espace perdu, et cependant un espace suffisant pour que la combustion soit la plus vive et la plus complète possible »<sup>567</sup>.

Le four de fusion de la verrerie du Pâturage de l'Envers, bien que mal conservé, est toutefois clairement identifiable et peut faire l'objet de comparaisons. Il est situé au centre de la halle. Il s'agit d'une construction symé-

trique: on aperçoit une maçonnerie centrale ovale pourvue de deux paires d'ailettes. « L'espace trapézoïdal délimité par ces massifs de fondation constitue l'accès au foyer; ce passage en léger talus est fermé par une voûte dénommée glaie. A son extrémité intérieure, au niveau du parement du four, la voûte porte le nom de tonnelle »<sup>568</sup> (fig. 190). L'élévation, très réduite, est constituée de deux ou trois assises de pierres calcaires. La partie centrale du four mesure 3,80 × 4,20 m; les ailettes ont une longueur maximale de 2,20 m et une épaisseur comprise entre 1 et 1,5 m. Le noyau du four, réalisé en argile réfractaire, est coupé par le canal de chauffe orienté est-ouest. Ce dernier est traversant: il peut être alimenté et entretenu à partir des deux extrémités. L'usage de quartiers de bois de longueur régulière (environ 1 m), faciles à manipuler, devait être la règle. De part et d'autre du canal-foyer, deux banquettes non conservées accueillaient les creusets. On sait, grâce aux recherches archéométriques, qu'elles étaient réalisées en argile réfractaire jaune<sup>569</sup>.

Une tranchée nord-sud, réalisée à travers le four de fusion au moyen d'une découpeuse

Fig. 190: Court, Pâturage de l'Envers. Plan du four de fusion. En rouge, emplacement de la tranchée de reconnaissance réalisée en 2002 à des fins d'échantillonnage in situ. Ech. 1:100.



567 Bontemps 1868, 137.

568 Gerber 2010, 51.

569 Eramo 2005b, 7.



thermique à béton, a permis d'observer ses fondations et d'analyser l'impact thermique de la structure sur l'encaissant (fig. 190-191). Sous le foyer, les verriers avaient creusé une fosse de 250 cm de largeur; sa forme n'a pas pu être observée, mais elle devait être ovale. Elle accueille la fondation du parement interne du four, ainsi qu'un massif de pierres calcaires de 40 cm d'épaisseur, servant de soubassement au foyer réalisé, lui, en réfractaire. Séparés du parement interne par une couche interstitielle de sable et d'argile, les calcaires du massif ont été transformés en chaux sous l'effet de la chaleur. Sous le four, le terrain encaissant argilo-limoneux a été complètement rubéfié, voire cuit, au point qu'il a notamment été impossible de l'entamer au pic dans la zone centrale.

## 6.2 Données archéométriques

Giacomo Eramo

L'étude intégrée des échantillons archéologiques des verreries de Court, Pâturage de l'Envers et Court, Sous les Roches, ainsi que des échantillons géologiques collectés dans le Petit-Val et dans le Chaluet ont fourni des informations importantes sur la fabrication des creusets et la technique constructive du four de fusion.

La tranchée creusée à travers le four de fusion de la verrerie du Pâturage de l'Envers a donné la possibilité d'investiguer sa structure interne, indiquant les détails technologiques cachés qui ne pouvaient être discutés par des observations typologiques. Le four de fusion a été construit en utilisant des matières premières locales de différents types. Des blocs calcaires de tailles variées provenant des éboulis de bas de pente proche du site ont été employés pour la structure tant interne qu'externe. Pour cette dernière, les blocs ont été liés avec une argile riche en fer (Bolus, Sidérolithique). Le parement externe est séparé de la structure interne par un espace rempli de sable lâche. Les briques ont été réalisées à façon directement sur le site et mises en œuvre sans cuisson préalable. Cela est démontré par la présence de fissures de rétrécissement sur leurs faces, par leur hétérogénéité



chromatique et minéralogique et encore par les débris vitreux incorporés au sein de la matrice argileuse (voir chap. 5.7.2). La composition chimique et la granulométrie des inclusions non plastiques des creusets et des briques réfractaires indiquent que tous les deux ont été réalisés dans la même argile réfractaire non traitée. Bien que le gisement de terre réfractaire de Court, Sur Frête soit celui dont les caractéristiques chimiques et granulométriques sont les plus proches de celles des matériaux réfractaires de la verrerie du Pâturage de l'Envers, on ne peut exclure, au vu de la variabilité du sable de Hupper, qu'il vienne d'ailleurs. En effet, les gisements de cette matière première dans une qualité équivalente sont envisageables ailleurs dans le Jura central. L'usage de ce sable argileux de qualité et disponible en abondance à proximité du site rendait tout traitement complémentaire inutile. L'usage mentionné par différents traités anciens d'incorporer à la pâte du broyat pilé de terre réfractaire issue de creusets usagés n'est pas attesté dans les verreries de Court. Il est probable que cette pratique n'ait pas été intéressante d'un point de vue économique et technologique, en raison de l'abondance et de la proximité même des gisements de terre réfractaire.

Fig. 191 : Court, Pâturage de l'Envers. Tranchée recoupant le four de fusion exécutée à la découpeuse thermique à disque. La fondation calcaire interne y est calcinée, l'encaissant puissamment rubéfié jusqu'à plus d'un mètre de profondeur. Été 2002. Vue vers le sud.

Dans notre four, les températures les plus élevées ayant été déterminées, que ce soit sur les éléments internes du four (parois de la chambre de fusion et du foyer) ou sur les tessons de creusets, varient entre 1370 et 1500° C<sup>570</sup>; les maxima étant atteints au niveau du foyer. Ces valeurs ne constituent pas des moyennes, mais des maxima atteints durant un laps de temps suffisant pour provoquer une modification minéralogique et structurale des creusets et des matériaux de construction du four. Les résultats obtenus mettent en évidence que les fours chauffés au bois étaient capables d'atteindre des températures très élevées, beaucoup plus élevées que les valeurs de liquidus généralement admises (1200-1350° C). D'ailleurs, Eramo a même démontré que le four contemporain de Flühli LU a atteint des températures encore plus élevées (1600° C) grâce aux conduits de ventilation latéraux aménagés sous les banquettes<sup>571</sup>. L'impact thermique du four de fusion a été observé jusqu'à près de deux mètres sous le foyer. Les analyses minéralogiques et chimiques pratiquées sur les nombreux échantillons prélevés au niveau de l'encaissant, du four de fusion et des creusets permettent de reconstituer la distribution des températures au sein de ce système (fig. 192). Pour les détails archéométriques, on se référera aux travaux qu'Eramo a consacré aux sites verriers de Court et de Flühli<sup>572</sup>.

Ces températures très élevées ont provoqué des transformations minéralogiques dans toutes les structures. Les sièges ou banquettes du four de fusion ont été endommagés par la calcination des blocs de pierre calcaire et leur réaction métasomatique<sup>573</sup> avec les briques réfractaires qui les habillaient. Dans le four, nous avons distingués trois agents d'altération différents :

1. le verre qui a débordé des creusets et a attaqué les sièges ;
2. la cendre de bois qui, en s'accumulant dans le canal de chauffe, réagissait avec les briques réfractaires des sièges ;
3. les vapeurs alcalines contenues dans les dégagements gazeux de la combustion du bois et de la fusion de la composition, qui attaquaient et corrodait la surface des réfractaires.

Quant aux creusets, leur face interne était rongée par le verre en fusion, tandis que leur face externe était attaquée par les vapeurs alcalines décrites ci-dessus.

Les résultats archéométriques obtenus sur deux briques de terre cuite du four annexe ont révélé une composition proche de celle du liant argileux utilisé dans le montage des blocs calcaires de la chambre de fusion. En outre, cette composition s'est avérée très similaire à celle des argiles rouges qui affleurent dans le Châlet. Les petites différences compositionnelles observées entre les deux briques pourraient mettre en évidence une production et/ou une mise en œuvre dans le four A164 à deux moments distincts. Comme ce fut le cas pour les sièges du four de fusion, ces briques ont été mises en place, alors qu'elles étaient encore relativement plastiques, c'est-à-dire crues ou séchées à l'air.

Les creusets ont, semble-t-il, aussi été façonnés sur place. Les caractéristiques macroscopiques et compositionnelles des creusets de la verrerie de Sous les Roches sont tout à fait comparables à celles des pots du Pâturage de l'Envers. Pour nos deux verreries successives, cela tend à démontrer non seulement la continuité d'exploitation d'un même gisement de terre réfractaire, mais aussi une continuité dans la technologie de production.

Quant à la composition pétrographique, minéralogique et chimique des pots à recuire du Pâturage de l'Envers, une origine locale est exclue. L'hypothèse d'une provenance de la région de Bonfol JU (Jura tabulaire) paraît se préciser. Des analyses archéométriques en cours devraient lever le voile sur ces céramiques spécifiques. Les tessons révèlent une sinterisation qui s'est déroulée durant la cuisson à des températures élevées, entre 900 et 1100° C, et dans des conditions essentiellement oxydantes. Les mesures de magnétisation thermorémanente pratiquées sur les tessons ont mis en évidence une certaine hétérogénéité des températures enregistrées. Ces variations dépendent de deux facteurs : la position originelle qu'occupait le tesson sur le pot et l'emplacement même dudit pot dans l'arche à recuire. Les températures mesurées qui ont dépassé les 580° C, associées à des traces de réexposition thermique, sont compatibles avec les températures de recuisson situées autour de 700° C

570 Eramo 2005a, 588 ; Eramo 2006a, 445-449.

571 Eramo 2006b.

572 Ces travaux ont été publiés séparément dans diverses revues scientifiques et regroupés en une thèse de doctorat : Eramo 2005b.

573 Processus diagénétique ou métamorphique qui, dans une roche, voit le remplacement de certains minéraux par d'autres. Pour les détails des analyses archéométriques, se référer aux travaux d'Eramo.

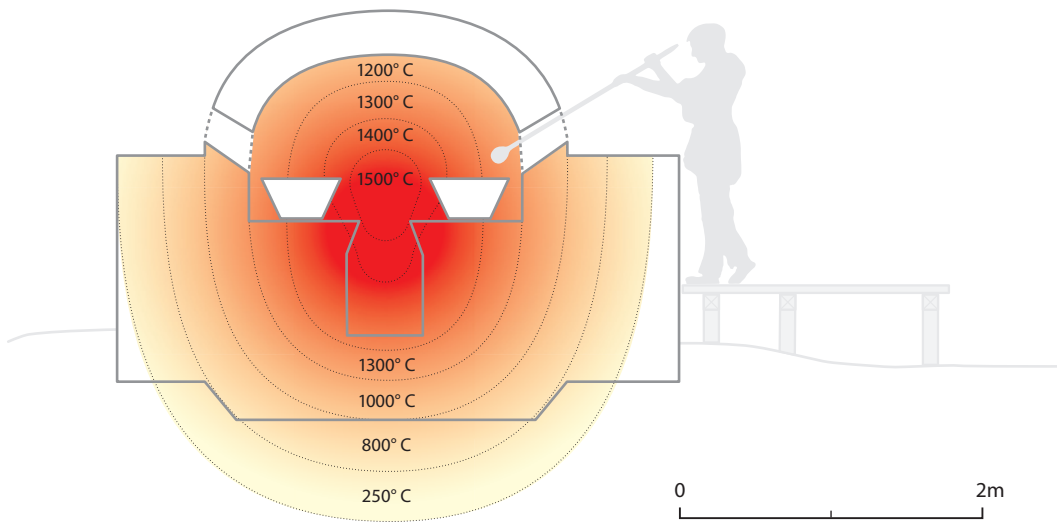


Fig. 192 : Court, Pâturage de l'Envers. Reconstitution schématique de la distribution thermique au sein du four de fusion élaborée sur la base des analyses archéométriques. Ech. 1:50.

pour un verre calcique-potassique. Ces résultats ont permis de valider l'hypothèse archéologique d'un usage étroitement lié au processus de recuisson : les pots couchés dans l'arche étaient remplis d'objets en verre au fur et à mesure de leur production (voir chap. 5.9).

### 6.3 Aspects pyro-technologiques

Les fours de fusion de Court, Pâturage de l'Envers et de Court, Vieille Verrerie sont tous deux de type nord-alpin, mais avec quelques différences structurales. Le four du Pâturage de l'Envers avait une chambre de fonte ovale, tandis que celui de la Vieille Verrerie (première verrerie en ce lieu) était plus allongé, presque rectangulaire<sup>574</sup>. Tous deux sont des fours à réverbération, dont l'énergie radiante était assurée par la flamme de combustion du bois, comme c'était le cas dans la plupart des verreries d'Europe continentale jusqu'au 18<sup>e</sup> siècle<sup>575</sup>.

En raison de sa composition riche en CaO, le verre forestier présente, par rapport aux verres sodo-calciques de la zone méditerranéenne<sup>576</sup>, deux obstacles majeurs : un point de fusion (température de liquidus) relativement élevé situé entre 1250 et 1500° C et un intervalle d'ouvrabilité (temps de travail) plus court. En tenant compte de l'hétérogénéité de la distribution des ingrédients de la masse vitrifiable dans les creusets, des températures supérieures au liquidus étaient nécessaires pour raccourcir le temps de fusion et pour obtenir un verre fluide, libre de bulles<sup>577</sup>.

Le bois offre un pouvoir calorifique inférieur à celui des combustibles fossiles<sup>578</sup>. Les températures de flamme mesurées pour le bois varient entre 1000 et 1800° C<sup>579</sup> et dépendent du pouvoir calorifique (env. 20 MJ/kg), de la teneur en eau, du taux d'oxygène et de la température de l'air dans le four. Le contrôle empirique de tous ces paramètres a permis aux verriers d'utiliser le bois comme combustible approprié, même pour la production de verre calco-potassique dont la température de liquidus est supérieure à celles du verre sodo-calcique (> 1100° C). Le pouvoir calorifique du bois ne représente pas en soi une limite thermodynamique pour atteindre de telles températures de flamme, mais le contrôle de chaque variable (carburant, air et tirage) pendant la combustion pouvait en effet affecter le fonctionnement du four ; la gestion de l'ensemble de ces paramètres détermine la pyrotechnologie. Puisque la teneur en eau du bois peut sérieusement abaisser la température de flamme, les verriers ont cherché à sécher le bois soit dans des fours spécifiques<sup>580</sup>, soit en utilisant les espaces disponibles sous la charpente de la halle chauffée par les différents fours en activité<sup>581</sup>. Cette pratique a eu pour incidence un rétrécissement de la bille de bois et une augmentation de sa température, à même de favoriser la réactivité du combustible<sup>582</sup>. La combustion est une réaction exothermique. Par conséquent, en augmentant la surface de contact avec l'usage de bois débité, le taux cinétique de combustion augmente. Afin d'obtenir un chauffage plus régulier, les troncs dépouillés de leur l'écorce<sup>583</sup> ont été débités dans des quartiers de même taille. Quoique la vitesse de

574 Rais 1954, 144.

575 Charleston 1978, 24.

576 Cable/Smedley 1987, 96 ; Smedley/Jackson 2002, 2 ; Eramo 2005a, 589-590.

577 Jackson et al. 1998, 338 ; Messiga/Riccardi 2001, 65-66.

578 Tillman 1978, 67.

579 Tillman 1989, 104.

580 Michel 1989, 231 ; Kirn 1833, 282-283 et pl. 3.

581 Kirn 1833, 278-279. Voir aussi ce volume, fig. 200.

582 Tillman 1991, 32.

583 Michel 1989, 230 ; Cable 1998, 327.



l'air dans le four du Pâturage de l'Envers ait, semble-t-il, été tributaire d'un tirage naturel, les aires de chauffe en forme d'entonnoir disposées de part et d'autre du canal de chauffe ont favorisé l'accélération de l'air de combustion (selon le théorème de Bernoulli) et permis de maximiser la température de flamme. Par ailleurs, l'activité continue du four durant une période assez longue (de six à huit mois) a contribué à atteindre une température homogène dans la chambre de fusion.

Le four de fusion du Pâturage de l'Envers était construit au moyen de différentes matières premières locales. Les unités pétrographiques et structurales observées dans sa section transversale ont permis de reconstituer l'impact thermique au niveau du socle et de l'encaissant. Cet impact était variable selon le matériau et la température atteinte (fig. 191-192). En outre, la durée d'exposition à la chaleur doit aussi être prise en considération pour expliquer la cinétique des réactions et les effets thermiques visibles dans la coupe transversale. Bien que ceux-ci découlent d'une exposition répétée aux cycles thermiques successifs, certaines unités structurales ont été modifiées ou substituées. Sous le four, le terrain encaissant révélait les effets thermiques cumulés pendant près de quatorze ans d'activité. Les matériaux réfractaires des banquettes et de la voûte montraient quant à eux les effets thermiques d'une exposition plus courte, en raison des réparations périodiques opérées à l'intérieur du four.

En se référant aux résultats minéralogiques, pétrographiques et chimiques obtenus<sup>584</sup>, l'intervalle de températures déterminé pour les matériaux réfractaires de la chambre de fusion et des creusets se situe entre 1370 et 1500° C. Ce résultat coïncide avec les températures de liquidus les plus élevées (environ 1400° C) relevées par Stern/Gerber<sup>585</sup> pour des verres produits dans ce même four de fusion. La terre réfractaire employée pour les briques des banquettes et de la voûte de la chambre de fusion, ainsi que pour le rechapage de la voûte et des ouvreaux, a résisté en vertu de son point eutectique élevé<sup>586</sup>, situé vers 1600° C. Dans les zones où le réfractaire était en contact avec les blocs calcaires des fondations, des réactions ont provoqué la corrosion et la destruction des banquettes. Bien que les gaz de combustion comportent différents composants, seul

l'oxyde de potassium  $K_2O$  libéré par le bois en combustion et par la masse vitrifiable contenue dans les creusets, a pu contaminer le réfractaire<sup>587</sup> au travers de sa surface rendue visqueuse (phénomène de vitrification). Comme les banquettes et les fondations avaient plus de peine à absorber la chaleur, cette énergie thermique a principalement contribué à la calcination du calcaire et à la réaction métasomatique entre le matériel réfractaire et le calcaire. La formation d'une phase fondue à la base des sièges a affecté leur stabilité<sup>588</sup>.

En raison de la saisonnalité des campagnes de travail du verre, le four de fusion a pu être en fonction durant six mois consécutifs environ par année. La longue exposition à la chaleur combinée à l'agression chimique due à la cendre volante et aux coulures de verre a limité la durée de vie du four. Des travaux de maintenance et de réparation étaient nécessaires après chaque campagne, une fois le four refroidi. Des défauts de construction ou des accidents survenus pendant une campagne ont parfois pu réduire encore la période d'activité<sup>589</sup>. La séparation entre structure intérieure et extérieure au moyen de lits de sable lâche a facilité la réparation des banquettes sans affecter la structure externe (socle). Ces différentes observations structurales mettent en évidence le soin apporté au choix des matières premières et à leur mise en œuvre. Si le matériel réfractaire a bien résisté aux températures nécessaires à l'élaboration du verre de forêt, avec une température de liquidus élevée, l'utilisation de blocs calcaires comme socle et noyau de fondation n'était guère optimal en raison de leur réactivité élevée (transformation en chaux par calcination).

Cette étude a mis en évidence les performances thermiques élevées des fours de fusion alimentés au bois durant la période préindustrielle. Les résultats obtenus démontrent que la pyrotechnologie des verreries forestières basées sur le combustible bois était encore à même de concurrencer les performances thermiques obtenues dans les installations plus récentes fonctionnant au moyen de combustibles fossiles. Nous formulons le secret espoir que la démarche choisie puisse inspirer de futurs projets de recherches en Suisse et à l'étranger, afin de mesurer avec encore plus de précision l'impact des évolutions technologiques.

584 Eramo 2005a, 582-588.

585 Stern/Gerber 2004b, 151-153.

586 Aramaki/Roy 1962, 231.

587 Eramo 2005a, 589; Eramo 2006c, 446-450.

588 Eramo 2005a, 589-590.

589 Pris 1975, 434-440; Michel 1989, 214.



## 6.4 Modes de construction et typologie

Laetitia Kaiser et aChristophe Gerber

De la réalisation de la voûte dépend la qualité thermique du four de fusion. Pour sa construction, deux solutions techniques principales sont envisageables. La première consiste à réaliser une voûte à l'aide de briques que l'on enduit d'argile réfractaire afin de colmater les interstices et d'obtenir une meilleure isolation thermique. La seconde alternative revient à fabriquer une voûte en tressant des matériaux organiques, à la manière d'un clayonnage, sur lesquels on applique plusieurs couches de coulis d'argile réfractaire.

Vu les températures atteintes dans le four de fusion du Pâturage de l'Envers, il aurait été peu avisé d'opter pour une voûte en matériaux organiques. Il semble que la première option de construction ait été privilégiée. La présence de briques étaye cette hypothèse. Leurs dimensions sont rarement conservées; néanmoins il a été possible de mesurer l'épaisseur de certaines pièces. Celle-ci s'accorde avec les standards dégagés pour les pains en argile réfractaire. La voûte, à base ovale, a été construite avec des pains placés de champ et disposés en assises (voûte assisée). La construction en briques présente également un avantage non négligeable: lorsqu'il faut effectuer des réparations, nul besoin de changer des briques, il suffit de boucher ou d'enduire les endroits endommagés avec de l'argile réfractaire. Certains auteurs mentionnent la présence d'un manteau de protection extérieur<sup>590</sup>. Il n'est pas possible d'affirmer qu'une telle construction existait au Pâturage de l'Envers, puisque l'épaisseur totale des éléments de voûte n'est jamais conservée.

De manière générale, on distingue deux grandes catégories de fours verriers: les « méridionaux » et les « septentrionaux »<sup>591</sup>. Les premiers, circulaires, ont une forme de dôme ou de ruche divisée en trois étages: la partie inférieure constitue le foyer, la chambre de fusion se trouve au centre, tandis que le compartiment supérieur sert d'arche à cuire. On retrouve cette disposition étagée dans la plus ancienne représentation médiévale d'un four de verrier: celle d'une copie du *De universo* de Ra-

ban Maur datée de 1023<sup>592</sup>. Agricola en fournit une description largement reprise aux siècles suivants: « Le plafond voûté de la chambre inférieure a un pied et demi d'épaisseur; cette chambre a une ouverture étroite à l'avant, pour que l'on puisse déposer le bois dans le foyer, placé sur le sol de la chambre. Au sommet et au milieu de la même voûte, se trouve un grand trou rond, qui s'ouvre vers la chambre [du milieu], pour que les flammes puissent y pénétrer, entre des arcs assez grands pour pouvoir y passer les pots ventrus [creusets], et les placer sur le sol de la chambre, autour du grand trou. [...] La chambre supérieure a deux trous, l'un du côté droit, l'autre du côté gauche, assez larges et hauts pour que l'on puisse facilement y placer les coffres [...]. On y met les objets de verre déjà soufflés, pour qu'ils soient refroidis lentement, sinon ils se briseraient »<sup>593</sup>.

Les fours septentrionaux présentent une partition horizontale et se déclinent en deux variantes: le four de type « bohémien » et celui de type « lorrain » (fig. 193). Le four « bohémien », muni d'une fournaise ronde ou ovale, présente pour particularité une arche à cuire accolée, généralement rectangulaire<sup>594</sup>. Dans ce cas, les ouvreaux sont disposés sur une section du pourtour du four de fusion. La plus ancienne source s'y référant est une description de Théophile dans son essai *Schedula Diversarum Artium*, compilé entre 1110 et 1140<sup>595</sup>. Le four « lorrain », souvent quadrangulaire et muni d'ailettes, est traditionnellement rattaché à l'espace français<sup>596</sup>. Le plus ancien four de ce type fouillé, daté de la fin du 16<sup>e</sup> siècle, aurait été mis en évidence à Rosedale (GB), à l'emplacement d'une verrerie potentiellement fondée par des artisans lorrains<sup>597</sup>. En 1991, dans sa typologie des fours verriers, Heinz Horat recensait une dizaine de fours à ailettes (type D) archéologiquement attestés en Grande-Bretagne, en Allemagne, en Belgique, au Luxembourg, aux États-Unis et en Suisse<sup>598</sup>.

Au niveau technologique, le four lorrain représente une évolution importante car il optimise la récupération de chaleur qu'il distribue dans des arches à cuire disposées de part et d'autre du four, ce qui contribue à diminuer la consommation de combustible et à offrir un volume de cuisson plus intéressant. En outre, Kirn nous apprend, dans sa comparaison du rendement et des coûts de production

590 Loysel 1799/1800, 54; Keess 1822, 847-848; Fontenelle/Malepeyre 1854, 132.

591 Cette catégorisation est proposée dans Charleston 1978, mais nuancée par Foy 1989, 143-148 et Philippe 1998, 137-147.

592 Abbaye du Mont-Cassin, Codex 132; cité d'après Charleston 1978, 11, fig. 1.

593 Agricola 1556/1992, 474-475 et 477, où l'on trouve l'illustration d'un fourneau à trois chambres.

594 Tarcsay 2009, 53-56 et fig. 34.

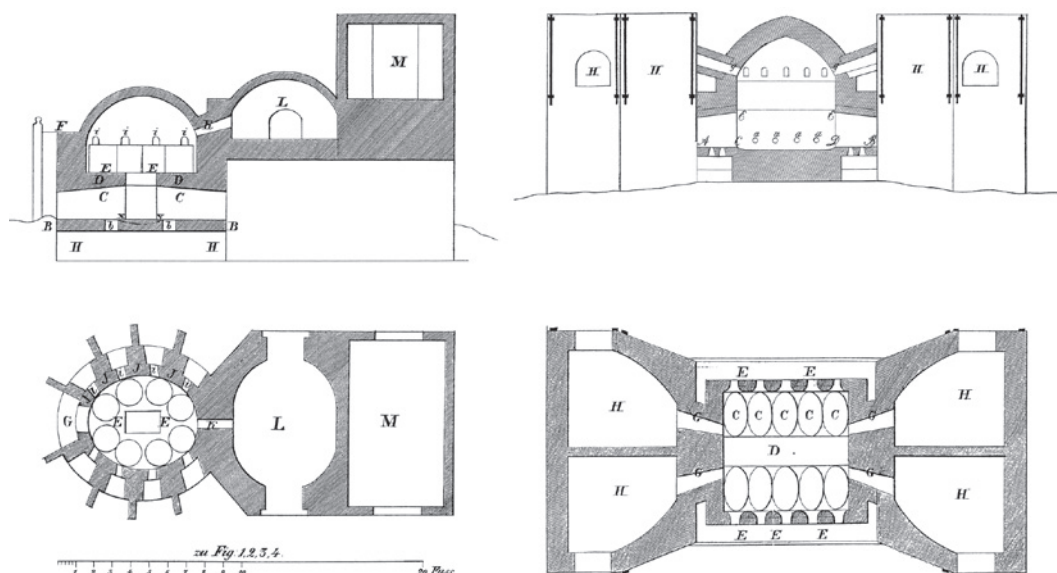
595 Théophile c.1125/1843, 79-82.

596 Kurzmann 2004, 127-128.

597 Crossley 1983, 149-150.

598 Voir Horat 1991, 54-55 pour Anlier (LUX); 66-69 pour Hutton Common et Rosedale (GB); 76-77 pour Savenel (BE); 90-91 pour New Bremen (US); 97-98 pour Wiesener Forst (DE); 100-101 pour Houghton Green et Kimmeridge Bay (GB); 110-111 pour Vann Copse et Buckholt (GB); Desceudres/Horat/Stöckli 1985, 16-19 pour Flühli-Südel (CH); Gerber 2010, 58 pour les autres fours verriers de ce type à Court.

Fig. 193 : Plans et coupes longitudinales de fours verriers encore en activité au 19<sup>e</sup> siècle. A gauche, four bohémien à huit pots, à droite, four à ailettes vosgien (type lorrain) à dix pots. Dans les deux cas, les arches à recuire (L et H) sont chauffées au moyen d'un conduit (K et G) qui les relie à la chambre de fusion. D'après Kirn 1830, pl. VIII, fig. 1-4 et Kirn 1831, pl. VI, fig. 4.



de deux verreries types produisant de la gobeletterie au début du 19<sup>e</sup> siècle, que la production d'un four bohémien à huit pots atteignait 2500 kg par semaine, tandis que le four lorrain de douze creusets était à même de fondre 6500 kg par semaine, soit bien plus du double<sup>599</sup>. Il est évident que dans ces deux exemples, les creusets utilisés, sans doute circulaires, sont bien plus grands que ceux des verriers de Court (chap. 5.8.2).

Le plan du four de Court, Pâturage de l'envers offre une variante hybride associant une fournaise presque circulaire, dans la tradition bohémienne, et des ailettes d'inspiration lorraine. La fournaise circulaire ou ovale présente un avantage dans la construction de la voûte, puisque la coupole qui clôt le foyer est plus aisée à réaliser et qu'elle offre de surcroît une meilleure réverbération que dans un four allongé.

En outre, autour d'un four rond, les places de travail sont disposées de manière radiale. Sur l'estrade, cette disposition offre un intervalle croissant entre les équipes à mesure que l'on s'éloigne du four. Cette variante de four lorrain à foyer circulaire est mal connue à l'heure actuelle, faute d'un corpus suffisant de verreries fouillées ou documentées. La verrerie alsacienne de Wildenstein (FR)<sup>600</sup> peut être rattachée à cette variante particulière, alors que le four de Court, Vieille Verrerie, avec son corps bombé, préfigure peut-être déjà cette forme<sup>601</sup>.

## 6.5 Reconstitution

La construction étant très arasée, aucun élément de l'élévation n'est apparu en place durant la fouille; néanmoins, d'importants paquets de démolition ont été mis en évidence autour du four. Ce dernier a été monté en briques crues (voir chap. 5.7.2); elles ont été réalisées en terre cuite ou en argile réfractaire. L'hypothèse avancée – sur la base des températures atteintes dans les différentes parties du four – est que les premières ont été utilisées pour la construction des arches à recuire alors que les secondes ont servi à la mise en œuvre du four de fusion. Les vestiges des banquettes, elle-mêmes en réfractaire, étayent cette hypothèse. On imagine que le four de fusion, qui se trouvait au centre de la construction, était flanqué d'une arche à recuire à chaque extrémité (fig. 194).

Les dix ouvreaux mentionnés par les archives étaient situés au nord et au sud de la construction. « Le four s'élève jusqu'à la hauteur du bord supérieur du pot, et à cette hauteur commence la naissance de la voûte. A chaque pot, correspond un ouvreau dont les dimensions répondent à la nature du verre à travailler. Le bord inférieur de cet ouvreau doit être de 2 à 3 centimètres au-dessus du bord du pot »<sup>602</sup>. Le verrier doit voir l'intérieur du creuset lorsqu'il travaille. En observant les fragments d'ouvreaux conservés<sup>603</sup>, on constate que leur partie inférieure présente

599 Kirn mentionne 50 Centner pour le premier et 130 Centner pour le second. Kirn 1830, 279 et 281.

600 Riff 1960, 199.

601 Rais 1954, 147 et Gerber 2010, 35.

602 Bontemps 1868, 138.

603 Ind. 2169 et 2171.





une légère pente (fig. 150-151, 195 et 198) ; elle permet d'accroître la visibilité du verrier. L'espace de travail ne se trouvait pas à même le sol, mais sur une estrade surélevée de 50 cm environ. Le four de Flühli-Südel, qui constitue le site de comparaison le plus proche de celui de Court (fig. 196), fournit de précieuses indications pour les banquettes. Le sommet du canal de chauffe, dont la section présente une hauteur de 80 cm pour une largeur variant entre 40 et 60 cm<sup>604</sup>, y constitue la base de ces dernières. Heinrich Leng<sup>605</sup> propose, lui, une hauteur moyenne de 28 pouces pour les banquettes, soit environ 70 cm.

Les parois intérieures du four ont été réalisées avec un matériau réfractaire. L'utilisation de briques a été mise en évidence (ind. 2170, fig. 152) ; il s'agit de pains que l'on imagine placés de champ, en alternance. A l'intérieur du four, les briques ont été recouvertes d'une couche d'argile réfractaire afin de colmater

les interstices. On remarque que tous les fragments de voûte présentent plusieurs couches de réfractaire, signe de multiples réfections. L'individu 2172<sup>606</sup> indique que la voûte était tendue et peu arquée. Les avantages d'une construction en dôme sont indéniables : elle réduit le volume du four, ce qui facilite la chauffe et permet d'utiliser une moindre quantité de combustible et elle permet une réverbération égale de la chaleur sur la surface des creusets. En l'absence d'éléments de parois complets, l'épaisseur de la voûte reste difficile à déterminer. Il est cependant possible de formuler une hypothèse grâce aux pains réfractaires. Sachant que les briques ont une largeur comprise entre 10 et 16 cm et qu'elles sont enduites sur la face intérieure d'une couche de réfractaire d'environ 2,5 cm<sup>607</sup>, la voûte devait avoir une épaisseur de 12 à 18 cm. *L'Encyclopédie* mentionne l'existence d'une seconde calotte, construite en briques réfractaires, destinée à

Fig. 194 : Court, Pâturage de l'Envers. Reconstitution virtuelle du four de fusion basée sur les données archéologiques, historiques et les parallèles iconographiques. Vue vers le sud-est.

604 Descœudres/Horat/Stöckli 1985, 16.

605 Leng 1835, 137.

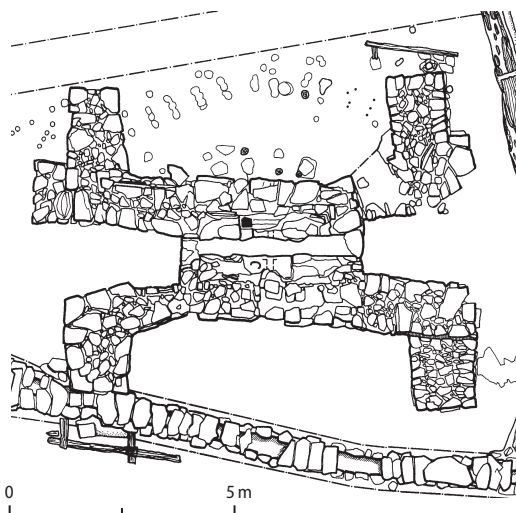
606 Voir fig. 157.

607 Une moyenne a été calculée à partir des multiples couches de rechapage mises en évidence.

Fig. 195 : Court, Pâturage de l'Envers. Coupe transversale virtuelle de la chambre de fusion reconstituée. Vue vers l'est.



Fig. 196 : Plan du four de fusion découvert à Flühli-Südel LU.



augmenter la solidité de l'édifice et à le préserver des agressions extérieures. Il est malheureusement impossible d'affirmer si notre four était doté d'une telle construction.

Les arches à recuire sont, quant à elles, nettement plus difficiles à reconstituer. « Sur la base des observations archéologiques (taille et forme des ailettes), des concentrations de céramique technique et des volumes moyennement importants de démolition, on peut estimer qu'une arche occupait chacune des extrémités supérieures du four »<sup>608</sup>. Deux croquis de Gustav Jung (fig. 197) réalisés vers 1660 et représentant un four à ailettes anglais du

17<sup>e</sup> siècle, sont utiles à la reconstitution. On suppose que les arches à recuire étaient situées au-dessus des aires de tisaie<sup>609</sup>. Pour accéder à l'alandier, il faut une hauteur de travail convenable d'environ 1,75 m. L'aire de tisaie devait être surmontée d'une voûte qui formait la base de l'arche à recuire. Sur les représentations de Jung, les ouvertures pour les arches à recuire sont placées sur les longs côtés du four. Les ouvertures arquées visibles percées sur les petits côtés contribuaient peut-être à la gestion des températures et du tirage au sein des différentes chambres. Nous estimons que la situation devait être très similaire au Pâturage de l'Envers. En effet, l'espace à l'est et à l'ouest du four n'est pas suffisant pour permettre un accès aisé aux arches à recuire ; la présence de gros poteaux porteurs aurait de surcroît gêné une telle installation. L'accès aux arches se faisait donc depuis le nord et le sud du four. Ce double accès se justifie par la taille et la profondeur des arches, même si celles-ci étaient subdivisées. La solution à deux ouvertures offre aussi l'avantage d'une manipulation facilitée des pots dans l'arche. On accède aux portes par l'estrade, sur laquelle avait peut-être été placé un escalier à deux ou trois degrés. Une voûte peu cintrée devait clôturer l'arche à recuire ; il s'agit de la solution la plus simple (fig. 194 et 198).

608 Gerber 2010, 60.

609 Gerber 2010, 60.



Les arches récupèrent la chaleur du four de fusion au moyen d'un conduit qui relie ces deux chambres. Ce principe perdure jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle, ainsi qu'en témoignent les représentations d'installations d'époque industrielle (fig. 193). La paroi séparant les arches de la fournaise devait être épaisse afin de réduire l'effet de la chaleur de contact. Une gravure datée vers 1820, représentant la verrerie d'Äule en Forêt-Noire (fig. 199), fournit un bon exemple pour la représentation de l'aspect général d'un four. On devine que le four de fusion est moins haut que les arches à recuire. On remarque également que chaque place de travail est séparée par une cloison; probablement pour protéger les verriers d'un accident de travail au cours des manipulations du verre en fusion. On imagine qu'un dispositif similaire existait au Pâturage de l'Envers. Cette reproduction est intéressante car elle montre une verrerie en plein essor et les différentes activités qui s'y déroulent.

## 6.6 Places de travail et gestes

Christophe Gerber

La reconstitution proposée, même si elle demeure hypothétique, n'en reste pas moins statique. Aussi aimerions-nous l'animer un peu en imaginant l'activité autour du four de fusion. Une des premières difficultés réside dans la détermination du nombre de personnes gravitant autour des différents ouvreaux, le four du Pâturage de l'Envers en comptant dix. Le soufflage du verre est une activité très hiérarchisée, en tout cas dès le 19<sup>e</sup> siècle, organisée autour d'un chef de place. A chaque place est rattachée une équipe composée de plusieurs membres, liée en principe à un seul ouvreau. Le nombre de personnes dépend de la tâche à accomplir: chacun exécute une opération bien définie. Si de nos jours, dans les manufactures verrières artisanales, il n'est pas rare qu'une équipe se compose d'un cueilleur, d'un maillocheur, d'un souffleur, d'un poseur de jambe et d'un porteur à l'arche par exemple, c'est essentiellement pour des raisons d'efficacité et de maximisation de la productivité. En cela la logique industrielle introduite au 19<sup>e</sup> siècle



Fig. 197 : Four à ailettes anglais croqué par Gustav Jung à l'occasion d'un voyage vers 1660. En haut, la vue latérale détaille le four de fusion, au centre, percé de trois grands ouvreaux circulaires et flanqué d'arches à recuire. La vue frontale montre trois arches, dont deux aménagées directement sur les larges ailettes; au centre, on remarque l'aire de tisaie. Sur la base de ce croquis, on doit admettre que ce four disposait de six arches servant tant à recuire qu'à fritter les compositions. Universitetsbibliothek, Uppsala.

reste parfaitement d'actualité avec la mécanisation des gestes. A l'époque de notre verrerie, gageons que les conditions de production étaient sans doute différentes, même si l'orientation vers une production de masse transparaît dans le choix de la qualité de verre retenue (verre commun) d'une part et le type de produits soufflés, à l'image des cives et des flacons de pharmacie, d'autre part. Les verres de facture complexe ou de qualité supérieure (incolors ou filigranés) sont rares; aussi peut-on estimer que le nombre d'intervenants par place devait se réduire à une ou deux personnes, ponctuellement trois, maître-verrier (chef de place) compris.

### 6.6.1 Sur l'estrade

L'estrade de notre verrerie apparaît relativement étroite avec sa profondeur restituée de 150-200 cm environ. Des cloisons légères devaient probablement séparer chaque place, ainsi que le suggèrent différentes représentations anciennes de verreries germaniques (fig. 198-200). Difficile dans ce cas d'admettre de grandes équipes s'activant simultanément sur ce plancher surélevé: on peut imaginer



Fig. 198: Court, Pâturage de l'Envers. Vue virtuelle écorchée à travers le four de fusion. Vue vers le sud-est.

deux personnes au plus par place, soit une dizaine de chaque côté du four. C'est l'impression que suggèrent les deux plus anciennes images d'Åule que nous reproduisons. Les verriers y travaillent par paire, alors que des gamins, évoluant au pied de l'estrade, portent au bout de piques ou de fourches les objets achevés destinés à l'arche à recuire.

En bordure d'estrade, chaque place disposait d'un baquet de tôle ou de bois contenant de l'eau. Ces contenants étaient fixés à des pieux profondément fichés dans le sol, dont la trace a été retrouvée au cours des fouilles (fig. 190)<sup>610</sup>. Chaque verrier disposait de ses propres outils: cannes, pontils, marbre, ciseaux; les mailloches de bois reposaient dans le baquet d'eau. Les opérations de cueillage, marbrage et maillochage se déroulaient sur l'es-

trade; les pièces de gobeletterie simple, constituées d'une seule paraison, étaient soufflées à la volée ou dans des moules disposés au pied de l'estrade, à même le sol. Un aide se chargeait de cueillir une pastille de verre en fusion au bout d'un pontil, afin de reprendre la pièce fraîchement soufflée et de permettre sa séparation de la canne. Pour des questions pratiques, cette opération devait se dérouler, elle aussi, sur l'estrade. La pièce était réchauffée brièvement à l'ouvreau avant d'être finalisée. Elle était portée à l'arche à recuire par un gamin au bout d'une pince ou d'une fourche. Parfois, la pièce pouvait être détachée directement du pontil après son introduction dans le pot à recuire couché; c'est ce que rapporte Mathesius<sup>611</sup>. Les deux chambres de recuisson disposées au-dessus des ailettes étaient acces-

610 Gerber 2010, 44-45, 31-32.

611 Mathesius 1562, 277. Au 19<sup>e</sup> siècle, Tabor relève une pratique similaire dans la bouteillerie (allemande ?) où les pièces sont portées encore empontillées à l'arche: Tabor 1818, 241.





Fig. 199 : Gravure représentant la verrerie allemande d'Äule (DE), vers 1820. Au centre de l'image, derrière le souffleur au visage caché par un chapeau, on devine le four de fusion et un ouvrier. Les places de travail sont séparées par une cloison de planches. Freiburg im Breisgau (DE), Augustinermuseum.



Fig. 200 : Peinture à l'huile de Michael Dilger représentant la verrerie allemande d'Äule, vers 1770/80. On notera la puissante construction anti-feu coiffant le four. Freiburg im Breisgau (DE), Augustinermuseum.

sibles depuis l'estrade, au moyen de quatre ouvertures disposées de manière symétrique aux extrémités.

Une source ethnographique récente relative à la verrerie française de La Rochère (FR) nous apprend que les « gobeletiers travaillent

seuls (...) la plupart ne savent que «cueiller», marbrer, maillocher, souffler au pouce et mouler»<sup>612</sup>. Cette image du travail « individuel » paraît coïncider avec les représentations de petites verreries de Forêt-Noire et semble transposable à l'atelier du Pâturage de l'Envers.

612 Barbe 1993, 68.



Fig. 201 : Gravure sur bois représentant la verrerie d'Äule (DE), réalisée d'après un dessin de F. Faller, vers 1880. Ce document livre une impression tardive dépouillée de la petite manufacture mettant en évidence l'outillage et la gestuelle. A droite, une cheminée surmonte l'arche à recuire.



Fig. 202 : Verrerie d'Äule (DE) : souffleur portant des planchettes de bois fixées sur ses cuisses. Détail de la fig. 198. Freiburg im Bressgau (DE), Augustinermuseum.



### 6.6.2 Au banc

Le travail au banc est réservé aux pièces plus complexes, à l'image des verres à pied qui nécessitent souvent plusieurs paraisons, des objets travaillés à la pince ou encore décorés d'appliques. Le banc s'apparente à un large siège sans dossier, de facture simple, comportant deux bras horizontaux, les bardelles, sur lesquels le verrier fait rouler la canne ou le pontil. En général, le banc est situé à proximité de l'ouvreau afin de raccourcir les déplacements et d'éviter un refroidissement intempestif du verre occasionnant une perte de malléabilité. Dans ce cas l'estrade ne se justifie plus : l'ensemble de l'espace de production gagne à être au même niveau. D'un point de vue archéologique, la présence de bancs reste difficile à identifier car il s'agit d'éléments mobiles. La mise en évidence d'accumulations de déchets spécifiques aux opérations de façonnage (découpes, filets) pourrait valoir d'argument, mais elle reste rarement effective, puisque les débris sont régulièrement récupérés et les places maintenues propres. Bien qu'aucune étude particulière n'ait été consacrée au banc de verrier, il nous semble que son introduction ait dû être assez tardive. La gravure illustrant le faux-titre de la première édition latine de *l'Arte*

*vetraria* de Neri donnée par Frisius en 1668<sup>613</sup>, constitue peut-être la plus ancienne représentation du banc de verrier à bardelles.

Dans une verrerie de petite dimension comme celle du Pâturage de l'Envers, on peut imaginer l'usage, en lieu et place d'un banc à bardelles qui occupe une place non négligeable, d'une simple planche comme siège. Cette hypothèse nous est suggérée par deux documents iconographiques illustrant la verrerie d'Äule (DE) qui datent respectivement du début et de la fin du 19<sup>e</sup> siècle : l'huile de Dilger et la gravure réalisée d'après le dessin de Faller (fig. 200-201)<sup>614</sup>. On y remarque une planche placée perpendiculairement à l'axe du four. Disposée à la limite de deux places de travail, elle peut même servir à deux verriers simultanément.

L'aquatinte de Meichelt recèle une autre curiosité, bien détaillée, touchant à l'équipement vestimentaire des souffleurs d'Äule. Ceux-ci portent en effet des pantalons sur lesquels des planchettes de bois ont été fixées au niveau des cuisses (fig. 202). Ce détail, quoiqu'assez discret, se retrouve chez Dilger, mais surtout sur l'illustration qui ouvre le premier volume de la *Bicchierografia* due au peintre italien Giovanni Maggi, daté de 1604<sup>615</sup>. On y voit, outre un four à coupole

613 Frisius 1668.

614 Nos remerciements à Michael Hütt, conservateur du musée Villingen-Schwenningen (DE), pour la mise à disposition du cliché numérique du dessin original de Faller ayant servi de modèle à la gravure sur bois.

615 Zecchin 1987, 148-152.



conforme à la tradition des fours du sud des Alpes, deux verriers au travail. Tous deux portent ces fameuses planchettes. Le personnage assis fait rouler sa canne sur les bardelles de bois qui protègent ses cuisses (fig. 203). Si l'origine de cette pièce d'équipement reste inconnue, Peder Månsson en relate déjà l'usage au cours du premier quart du 16<sup>e</sup> siècle<sup>616</sup> !

Ces planchettes, qui préfigurent le système de bardelles caractéristiques du banc de verrier, garantissent un encombrement minimal et une certaine mobilité au souffleur. Elles sont opérationnelles lorsque le verrier s'assoit et que ses cuisses forment un plan horizontal permettant la rotation de la canne. Luigi Zecchin, spécialiste de la verrerie muranaise, signale que ces planchettes n'apparaissent dans les actes du 16<sup>e</sup> siècle que sous leur forme singulière : il est fait référence à la *bardella*<sup>617</sup> et non aux *bardelle*. Mais selon lui, cela ne saurait exclure, un usage par paire comme l'atteste l'iconographie légèrement postérieure. Curieusement, ce terme sans doute italien à l'origine a survécu sous sa forme francisée pour désigner in fine les fameux bras horizontaux des bancs de verrier ! Il est tout à fait envisageable qu'en raison de l'exiguïté des estrades, les verriers du Pâturage de l'Envers aient utilisés des bardelles fixées à leur pantalon.

En conclusion, ces planchettes, dont l'usage est encore attesté au 19<sup>e</sup> siècle dans certaines régions, probablement dans les petites verreries, paraissent avoir été remplacées, dans les grandes manufactures, par le banc de verrier (fig. 204), peut-être dès le 17<sup>e</sup> siècle. En bois à l'origine, il a été conçu en fer à l'époque industrielle. Son introduction et sa diffusion se rattachent, à notre avis, à l'essor des manufactures verrières qui, dès la seconde moitié du 18<sup>e</sup> siècle, adoptent une organisation plus hiérarchisée du travail avec l'introduction progressive des notions de place et d'équipe.

### 6.6.3 Estimation de la production

En l'absence de comptabilité et de documents-clés propres à la verrerie, l'estimation de la production de notre site s'avère délicate. Si nous savons que 286 tonneaux de sable ont été véhiculés entre 1700/01 et 1714/15 (voir chap. 2.1.1), nous sommes incapables de pré-



Fig. 203 : Deux verriers italiens portant sur leurs cuisses les fameuses bardelles de bois. Dessin de 1604 dû à Giovanni Maggi. Tiré de Zecchin 1987, 151.



Fig. 204 : Le banc de verrier permet un travail précis par rotation du pontil sur les bardelles. Tiré de : Diderot/D'Alembert 1772/2002, *Verrerie en bouteilles* pl. VI, fig. 2.

ciser ce volume dans une unité actuelle, car la mesure utilisée, le tonneau, n'a malheureusement rien de très officiel, du moins dans la principauté épiscopale bâloise. Néanmoins, il est possible d'empoigner la question du rendement en partant du volume du creuset. Sachant que la fusion de la composition prend une bonne dizaine d'heures, il apparaît que cette opération devait se dérouler la nuit, le jour étant réservé au soufflage. La fusion de la composition se fait par étape : la matière est ajoutée progressivement en attendant que la charge précédente ait fondu (voir chap. 2.2.1). En effet, le verre en fusion accélère le processus de fonte de la charge suivante.

<sup>616</sup> Månsson/Johannsen 1941, 186 : « Sie tragen hierbei ein Holz von zwei Finger Breite, das am rechten Oberschenkel bis herab zum Knie angebunden ist ». Månsson est un moine suédois qui consacra un chapitre à la verrerie dans ses cahiers manuscrits relatifs aux mines.

<sup>617</sup> Zecchin 1987, 151.

Le four du Pâturage de l'Envers comportait dix ouvreaux correspondant à autant de creusets. Sur la base des données en notre possession (voir chap. 5.7.2), nous pouvons estimer le rendement journalier théorique de la verrerie à 120 l ou 300 kg de verre. À cette masse, il convient évidemment de soustraire le verre qui finit au casson en vue d'un recyclage : restes de paraisons, découpes, déchets et objets ratés. Les indications qui nous ont été fournies par Eva Van Eeckhout-Bartova et Allain Guillot, deux verriers traditionnels, révèlent que dans la production de menu verre, 50 à 60 % du poids de la paraison soufflée finit sous forme de débris et déchets divers. Ce pourcentage dépend évidemment du type d'objet produit : les petites fioles médicales produisent, par exemple, moins de débris qu'un verre à jambe en balustre qui nécessite trois paraisons distinctes. Les exigences en termes de qualité diffèrent aussi sensiblement entre ces deux produits. Ainsi donc, dans notre cas de figure, on peut estimer que 120 à 150 kg de verre était produit quotidiennement sur le site.

Au début du 18<sup>e</sup> siècle, les fours n'étaient guère adaptés à une production continue : ils nécessitaient des réparations régulières, en particulier la chambre de fusion très sollicitée d'un point de vue thermique. Cela explique la relative brièveté des campagnes de production qui n'excédaient guère six mois (voir chap. 2.1.6.2 et 5.8.4). En admettant une campagne de 26 semaines (six mois) à six jours ouvrés par semaine, le four aurait fonctionné durant quelque 156 jours. Au vu des estimations qui précèdent, il s'avère possible d'évaluer la production « saisonnière » théorique à  $120 \text{ kg} \times 156 \text{ j} = 18\,720 \text{ kg}$  (voir aussi chap. 4.3.2). En partant des recettes calculées par Gerber/Stern, les besoins en sable vitrifiable se montent à un peu plus de 12 000 kg. Cela présuppose évidemment que l'ensemble des ouvreaux sont occupés et produisent durant toute la période retenue.

À ce stade, il nous paraît intéressant de préciser ce qu'une production quotidienne de 120 kg de verreries soufflées représente en

termes de pièces. Ici encore, Van Eeckhout-Bartova nous apporte, dans une communication orale, son expérience et son expertise, elle qui reproduit des verres à l'ancienne selon des compositions traditionnelles : un verre à jambe pèse environ 120 g et une carafe 500 g. Par jour, un verrier habile produit environ 40 verres à vin de qualité, ce qui représente un poids total de 4,8 kg environ. En revanche, les bouteilles communes, les fioles médicales et les gobelets moulés sont nettement moins gourmands en temps de réalisation et peuvent être produits à la chaîne. Au Pâturage de l'Envers, une fiole médicale piriforme à fond refoulé de 30 mm de diamètre et 45 mm de haut, pèse environ 10 g. En théorie, un souffleur pourrait donc en produire quelque 1200 quotidiennement, soit 12 kg.

Les comptabilités d'entreprises verrières antérieures au 19<sup>e</sup> siècle sont rares en Suisse et aucun document n'est disponible pour la région jurassienne. Aussi, les quelques informations comparatives glanées ici et là offrent-elles un éclairage bienvenu. Ainsi, par exemple, en 1619, la verrerie de Grassert (DE), en Forêt-Noire, a produit 35 800 vitres (peut-être des cives), 22 068 pièces en verre opaque blanc, 25 568 verres à boire (Trinkgläser), 4500 verres à eau (Wassergläser) et 300 bouteilles<sup>618</sup>, fruit probable d'une seule campagne dont la durée demeure inconnue. Michel Philippe signale qu'au milieu du 17<sup>e</sup> siècle, dans la verrerie lorraine de la Planchotte (FR), huit ouvriers répartis en quatre équipes (œuvrant donc sur quatre ouvreaux) parvenaient à produire 4000 « verres de cabaret ordinaires » par jour<sup>619</sup>. Au milieu du 18<sup>e</sup> siècle, les trois ou quatre verriers actifs à la Vieille-Loye (FR) soufflent quotidiennement environ 600 pièces d'assortiment ou 300 bouteilles<sup>620</sup>, des chiffres qui coïncident avec ceux énumérés précédemment.

Les chiffres évoqués ci-dessus révèlent qu'il nous faut compter avec la production de milliers de pièces chaque jour. Les fragments collectés et individualisés ne représentent en définitive qu'une infime part de ce qui est effectivement sorti de l'atelier !

618 Moser 1969, 17, repris par Bertram Jenisch dans Maus/Jenisch 1998, 468. Vu la nature des trouvailles collectées sur le site, Jenisch nous suggère (communication orale) de voir dans la distinction Trinkgläser/Wassergläser une référence à des verres de formes différentes ; les Trinkgläser renvoyant plutôt à la consommation de vin (Krautstrunk, Berkenmeier et verre à pied), alors que les Wassergläser suggéreraient les gobelets type Maigelbecher.

619 Une journée équivalant à douze heures de travail ; Philippe 1998, 313. Malheureusement, Jacqueline Bellanger n'évoque pas le terme verre de cabaret dans son magnifique ouvrage (Bellanger 1988) ; on peut penser qu'il est fait référence aux verres à boire communs, aux verres de bistro exécutés dans un verre ordinaire plutôt de couleur verte.

620 Michel 1989, 255.

## Résumé/Zusammenfassung/Summary

Christophe Gerber

### Résumé

Le vaste site verrier de Court, Pâturage de l'Envers a été fouillé entre 2000 et 2004 dans le cadre des travaux autoroutiers de l'A16 Transjurane. Un premier volume consacré aux vestiges archéologiques est paru en 2010. La présente publication, centrée sur les aspects techniques et technologiques de la production verrière, constitue le second volume d'une monographie qui en compte quatre au total. Deux volumes de catalogues commentés complèteront encore cette importante publication.

Le 27 septembre 1699, le prince-évêque de Bâle amodie pour quinze ans une vaste forêt à un groupement de verriers, en partie déjà actifs dans la région, désireux d'établir une nouvelle manufacture forestière à Court. Sitôt le contrat en poche, les verriers purent faire déboiser l'espace nécessaire à l'installation du site : construction de la halle, des maisons et des baraquements qui abriteraient les verriers et leur famille, ainsi que leurs manouvriers et coupeurs de bois. L'exploitation ne dura guère au-delà de 1714.

La région recèle des gisements sidérolithiques riches en sable quartzeux et en terre réfractaire de qualité, dont l'exploitation remonte probablement à plusieurs siècles. Les documents historiques mentionnent d'abondantes livraisons de terre argileuse en 1701-1702, en provenance de Sornetan. Celles-ci furent sans doute destinées à la construction des fours qui ne purent donc être allumés qu'après 1702. Jusque-là, les verriers ont probablement continué d'exploiter les fours de la verrerie de Court, Sous les Roches, située à moins d'un kilomètre, même si leur bail était arrivé à son terme.

Les verriers consomment d'énormes quantités de bois, en particulier pour la production de la cendre. Celle-ci entre dans la composition vitrifiable et permet d'abaisser le point de fusion du sable. Les volumes ligneux nécessaires dépendent du type de fours utilisés, de la durée des campagnes, mais aussi de la qualité des

sables sélectionnés. Pour la verrerie du Pâturage de l'Envers, on a pu estimer qu'elle dévorait près de 11 ha par an, un tiers des volumes abattus servant à la seule production de cendres (chap. 2 et 4). Ces valeurs coïncident avec celles connues pour d'autres sites verriers contemporains. Les minéraux qui composent la cendre de bois proviennent en particulier du substrat sur lequel les arbres ont grandi et déterminent dans une large mesure le chimisme du verre.

La fouille du site a livré de nombreux fragments de verres finis, mais aussi des déchets et débris de production. Rarement étudiés jusqu'ici, ils ont fait l'objet d'une attention particulière. Le traitement statistique des données livre des indications intéressantes quant à l'éventail des produits, en particulier des teintes réalisées (chap. 3). Ainsi, plus de 75 % de la production se rattachent au verre ordinaire, de teinte verte. Le vitrage y occupe une place importante en termes de pièces avec près de 50 % du corpus et un peu plus de 30 % du poids. Les cives y sont encore réalisées en masse, alors qu'une production timide de verre plat, selon la technique du manchon, voit le jour. La réalisation de verre en calotte est aussi attestée. A l'image des petites verreries traditionnelles, dites de menu verre, le site du Pâturage de l'Envers s'attache à offrir une palette de produits assez large. Ainsi trouve-t-on, à côté du vitrage, des contenants pharmaceutiques ( fioles, pots et bouteilles diverses) et des verres à boire, en particulier des gobelets à décor moulé (verrues circulaires ou de gouttes) et des verres à jambes en balustre creux d'inspiration vénitienne. A ce stade de l'étude, il apparaît déjà que les verres à boire trahissent des influences germaniques pour une part (décor moulé de verrues, pied et jambe en verre filigrané) et françaises d'autre part (verre à jambe en balustre creux). Ils sont majoritairement de type ordinaire, c'est-à-dire de couleur verte. Les productions incolores représentent moins d'un quart du service de table identifié. Les bouteilles de vin pansues, quoique peu nombreuses,

sont également représentées sur le site, mais leur fabrication sur place reste incertaine.

Le vaste programme d'analyses chimiques réalisé à l'Université de Bâle, sous la direction de W. B. Stern, portait sur 341 échantillons, dont 199 verres. Les résultats ont permis de distinguer deux groupes de verre qui se différencient non seulement par leur couleur, mais surtout par leur composition chimique (chap. 4). Le premier coïncide avec la production traditionnelle de « verre ordinaire », le *Waldglas* allemand, dont la teinte oscille entre le vert pâle et le vert foncé, selon la finesse des parois. Il s'agit d'un verre calco-potassique produit à partir d'une composition associant sable et cendre brute. Le second groupe rassemble des productions dont la teinte tend vers l'incolore en gardant parfois des reflets jaunâtres ou grisâtres. Par rapport aux verres du premier groupe, ils présentent des caractéristiques chimiques particulières : faible taux de phosphate, de fer et d'aluminium, alors que le taux de potassium est élevé. Ces spécificités trahissent, selon les chercheurs Y. Gerber et W. B. Stern, l'usage d'un composé riche en potassium (éluant), que les verriers obtenaient par décantation et filtration de la cendre. Ajouté à la composition vitrifiable sous forme séchée, celui-ci y faisait office de fondant. Par contre, les éléments minéraux solubles teintants étaient retenus au sein des résidus de filtration qui n'entraient pas dans la production de verre incolore. Par contre, ces verres à haute teneur en potassium se distinguent par un taux de manganèse généralement plus élevé. La qualité incolore du verre découle en premier lieu de la pureté des matières entrant dans la composition vitrifiable ; l'ajout intentionnel de manganèse aurait permis d'atténuer un éventuel aspect verdâtre. La découverte sur le site de fragments de minerai très riches en manganèse vient corroborer cette hypothèse. Quoique l'étude des productions du site ne soit pas encore achevée (volume 4 en préparation), il apparaît que le verre incolore, plus exigeant au niveau du traitement des ingrédients, notamment de la cendre, ne représentait qu'une part négligeable des productions. Il était réservé en particulier à la verrerie de table de qualité supérieure.

L'analyse des éléments constitutifs du four de fusion (chap. 5) révèle l'usage de deux catégories de briques distinctes : les unes en terre

cuite brun-rouge, les autres en argile réfractaire beige-jaune. Les premières, moins résistantes et peu adaptées à l'intensité du feu d'un four réverbère, ont servi à la construction des arches à recuire disposées de part et d'autre du four de fusion. Elles sont moulées et révèlent une forme de parallélépipède ou de claveau. Les spécimens recueillis trahissent différents formats. Les briques du second groupe, en raison de leur composition sableuse et kaolinique, possédaient un caractère réfractaire qui les prédestinait à la réalisation des banquettes et de la voûte du four de fusion. Moulées elles aussi, elles apparaissent sous une forme parallélépipédique, mais prennent parfois aussi l'aspect d'un pain aplati aux coins arrondis.

L'étude archéométrique des briques, des éléments de voûte et des creusets réalisée par G. Eramo dans le cadre d'une thèse à l'Université de Fribourg a mis en évidence les excellentes qualités thermiques des réfractaires mis en œuvre. Les résultats déjà publiés sont présentés, sous une forme résumée, au sein des différents chapitres. La formation de phases cristallines caractéristiques de hautes températures, comme la cristobalite et la mullite, a révélé qu'à l'intérieur du four de fusion du Pâturage de l'Envers, des températures très élevées, situées entre 1370 et 1500° C selon les parties, ont été atteintes ponctuellement au moins, soit bien au-delà de ce qui était communément admis par la communauté scientifique. Ces résultats démontrent l'extraordinaire capacité thermique des fours de l'extrême fin du 17<sup>e</sup> siècle, mais aussi la maîtrise technique des artisans-verriers. Les briques réfractaires, les creusets et l'argile ayant servi au rechapage des parois internes du four ont révélé une composition minéralogique et structurelle uniforme. La confrontation de ces données avec celles obtenues sur une collection d'échantillons, prélevés dans des gisements de sable argileux sidérolithiques de la Vallée de Tavannes et du Petit-Val, permet de proposer le secteur de Monible comme probable source d'approvisionnement de nos verriers. Cette hypothèse a d'ailleurs été corroborée par des documents historiques qui mentionnent la livraison de terres réfractaires en provenance de Sornetan, le village voisin ! Quant aux briques communes, elles ont sans doute été confectionnées à partir de terres argileuses extraites sur le site verrier même.



Les données archéométriques des verres, des matériaux réfractaires (briques, parois de four et creusets) et des matières premières (sable, cendre) couplées aux observations archéologiques permettent d'appréhender le fonctionnement du four (chap. 6). En dépit de vestiges de four très arasés, les résultats obtenus nous autorisent à proposer une modélisation du système thermique associant le four de fusion et les arches attenantes qui servaient à la cuisson des verres achevés.

### Zusammenfassung

Die grosse Glashütte von Court, Pâturage de l'Envers ist in den Jahren 2000 bis 2004 im Rahmen des Autobahnprojekts A16, Transjurane, archäologisch untersucht worden. Eine erste Monografie, welche die archäologischen Befunde vorstellt, ist 2010 erschienen. Der vorliegende zweite Band befasst sich mit den technischen und technologischen Aspekten der Glasherstellung. Zwei Katalogbände werden die gesamte Publikation abschliessen.

Am 27. September 1699 gibt der Fürstbischof von Basel einer Gruppe von Glasern, die zum Teil bereits in der Gegend tätig waren und bei Court eine neue Waldglashütte zu errichten wünschten, ein grosses Waldgebiet für die Dauer von fünfzehn Jahren in Pacht. Nach Unterzeichnung des Vertrags konnten die Glasmacher unverzüglich das Gelände roden lassen, das sie für den Bau ihrer Infrastruktur benötigten: die Glashütte sowie Häuser und Baracken für die Glaser und ihre Familien, für die Hilfsarbeiter und für die Holzfäller. Die neue Manufaktur stand kaum länger als bis ins Jahr 1714 in Betrieb.

Die Region birgt Lagerstätten des Siderolithikums, die reich an Quarzsand und Huppererde sind und die vermutlich seit mehreren Jahrhunderten ausgebeutet werden. Die historischen Dokumente belegen Lieferungen von Huppererde aus Sornetan um 1701/02. Diese wird zweifellos für den Bau der Öfen bestimmt gewesen sein, die damit erst nach 1702 in Betrieb genommen worden sein dürften. Bis zu diesem Zeitpunkt nutzten die Glaser vermutlich die kaum einen Kilometer entfernten Öfen der Hütte von Court, Sous les Roches weiter, obschon dieser Pachtvertrag ausgelaufen war.

Die Glasproduktion verschlingt Unmengen von Holz, nicht zuletzt für die Gewinn-

nung von Asche. Diese wird als Flussmittel zur Senkung des Schmelzpunktes dem Glasgemenge beigegeben. Die benötigte Holzmenge ist abhängig vom Ofentyp, der Betriebsdauer der Hütte und der Qualität des zur Verfügung stehenden Sandes. Für die Glashütte von Pâturage de l'Envers schätzen wir einen Jahresbedarf von fast 11 ha Wald, wobei ein Drittel allein der Produktion von Asche diene (chap. 2 und Kap. 4). Diese Daten stimmen mit denjenigen zeitgleicher Glashütten überein. Die Zusammensetzung der in der Holzasche enthaltenen Mineralstoffe ist stark von der Beschaffenheit des Bodens, auf dem die Bäume gewachsen sind, abhängig und sie bestimmt weitgehend die Chemie des Glases.

Während der Ausgrabung sind viele Fragmente von fertig produziertem Glas, aber auch Produktionsabfall gefunden worden. Dieser wurde bisher kaum untersucht, wir haben ihm daher besondere Beachtung geschenkt. Die statistische Auswertung der Daten liefert interessante Hinweise auf das Produktespektrum, insbesondere auf die Farbtöne des produzierten Glases (chap. 3). So kann über 75 % der Produktion dem gewöhnlichen, grünen Glas zugewiesen werden. Fensterglas nimmt mit Anteilen von nahezu 50 % der Fragmente und über 30 % des Gewichts eine wichtige Stellung ein. Die Butzenscheiben werden noch in Massen hergestellt, während eine Produktion von Flachglas nach dem Zylinderblasverfahren erst zaghaft einsetzt. Die Anfertigung von «Tellerscheiben» ist auch nachweisbar. Wie andere kleine, traditionelle Glashütten – «de menu verre» genannt – bemüht sich die Hütte von Pâturage de l'Envers darum, eine recht grosse Palette von Produkten anzubieten. So findet man neben dem Fensterglas auch Apothekergefässe (Phiolen und verschiedene Töpfe und Flaschen) und Trinkgläser, besonders Becher mit rundem Warzen- oder Tropfendekor sowie Kelchgläser mit Hohlbalusterschäften nach venezianischem Vorbild. Beim momentanen Stand unserer Untersuchungen scheinen sich bei den Trinkgläsern einerseits deutsche Einflüsse (Warzenbecher, Kelchgläser mit Fuss und Schaft in weissem Fadenglas), andererseits französische Einflüsse (Kelchgläser mit Hohlbalusterschaft) abzuzeichnen. Grösstenteils handelt es sich um grünes Gebrauchsglas. Die farblosen Produkte machen weniger als einen

Viertel der als Tafelgläser identifizierbaren Gefässe aus. Bauchige Weinbehälter sind mit wenigen Exemplaren ebenfalls vertreten, ihre Herstellung vor Ort bleibt jedoch unsicher.

An der Universität Basel wurden unter der Leitung von W. B. Stern umfangreiche chemische Analysen durchgeführt. Es wurden insgesamt 341 Proben, darunter 199 Glasproben, untersucht. Als Ergebnis können wir unter den Gläsern zwei Gruppen erkennen, die sich nicht bloss durch ihre Farbe, sondern insbesondere durch ihre chemische Zusammensetzung unterscheiden (Kap. 4). Die erste entspricht der traditionellen Produktion von Waldglas, dem französischen «verre ordinaire», dessen Farbton je nach Wanddicke von blassgrün bis dunkelgrün variiert. Es handelt sich dabei um Kalium-Calcium-Glas, dessen Rohstoff eine Mischung aus Sand und reiner Asche bildet. Die zweite Gruppe umfasst Gläser, deren Farbton gegen farblos tendiert, unter teilweiser Beibehaltung eines gelblichen oder gräulichen Schimmers. Im Vergleich zur ersten Gruppe weisen sie verschiedene chemische Besonderheiten auf: geringe Anteile an Phosphat, Eisen und Aluminium, aber einen erhöhten Anteil an Kalium. Diese Eigenheiten verraten nach Y. Gerber und W. B. Stern die Verwendung von Pottasche. Die Glasmacher stellten diese durch Dekantieren und Filtrieren von Asche her, wodurch ein kaliumreiches Eluat extrahiert wurde, das getrocknet und als Flussmittel dem Glas zugegeben wurde. Die löslichen, färbenden Mineralbestandteile hingegen verblieben im Aschenrückstand, der für die farblose Glasproduktion nicht verwendet werden konnte. Hingegen zeigen die Gläser mit hohem Kaliumanteil auch einen erhöhten Gehalt an Mangan. Die Farblosigkeit des Glases ist primär durch die Reinheit der Ausgangsmaterialien zur Glasherstellung bedingt, eine intentionelle Zugabe von Mangan dürfte aber eine eventuelle Grünstichigkeit abgeschwächt haben. Auf dem Grabungsareal gefundene, stark manganhaltige Gesteinsfragmente untermauern diese Hypothese. Obschon die Untersuchungen des Fundmaterials noch nicht abgeschlossen sind, zeichnet sich ab, dass farbloses Glas, dessen Rohstoffe – und unter ihnen besonders die Pottasche – eine aufwendige Aufbereitung voraussetzten, bloss einen verschwindend kleinen Anteil an der Gesamtproduktion

ausmachte. Es diente besonders zur Herstellung von Tafelgeschirr besserer Qualität.

Die Untersuchung der Baustoffe des Schmelzofens (chap. 5) zeigt die Verwendung von zwei verschiedenen Backsteintypen: von braunroten Tonziegeln und gelbbeigen Ziegelsteinen aus Huppererde. Die ersteren, die wenig hitzebeständig sind, dienten zum Bau der Kühltöfen, die den Schmelzofen beidseitig flankierten. Sie wurden in Modeln als Quader oder Keile geformt. Die Exemplare lassen erkennen, dass es unterschiedliche Grössen gab. Der zweite Backsteintyp besass aufgrund seiner sandigen und kaolinitischen Zusammensetzung die Eigenschaft von Schamottesteinen, womit er für den Bau des Schmelzofens geeignet war. Auch hier handelt es sich um modelgeformte Quader, wobei es aber auch einige gibt, die wie Brotlaibe aussehen.

Die archäometrische Untersuchung der Backsteine, Gewölbeelemente und Glashäfen wurde von G. Eramo an der Universität Fribourg im Rahmen einer Dissertation durchgeführt. Sie zeigt auf, dass die verwendete Huppererde hervorragende thermische Eigenschaften aufwies. Die anderswo bereits publizierten Daten werden hier in den verschiedenen Kapiteln in gekürzter Form eingebracht. Die Bildung kristalliner Modifikationen wie Cristobalit und Mullit belegt, dass im Schmelzofen sehr hohe Temperaturen, je nach Ofenpartie 1370 °C bis 1500 °C, erreicht wurden – deutlich mehr als bisher von der Wissenschaft angenommen. Diese Resultate belegen die aussergewöhnlichen thermischen Eigenschaften der Öfen des späten 17. Jahrhunderts und auch die technischen Fähigkeiten der Glaser.

Die Huppererde-Ziegel, Häfen und der Lehm, der zur Ausbesserung der Innenwände diente, zeigen eine einheitliche mineralogische und strukturelle Zusammensetzung. Der Vergleich der entsprechenden Daten mit denjenigen von Proben, die aus Huppererde-Lagerstätten im Tal von Tavannes und im Petit-Val entnommen wurden, erlaubt uns, als Herkunftsgebiet der von unseren Glasmachern verarbeiteten Rohstoffe die Gegend um Monible zu postulieren. Diese Hypothese wird durch historische Dokumente bekräftigt, in welchen die Lieferung von Huppererde aus dem Nachbarort Sornetan erwähnt wird. Die gewöhnlichen Backsteine hingegen sind zweifelsohne

aus Lehm geformt worden, der aus der unmittelbaren Umgebung der Glashütte stammte.

Die archäometrischen Daten der Gläser, der Baustoffe aus Huppererde (Backsteine, Ofenwände, Schmelztiegel) und der Rohstoffe (Sand, Asche), gekoppelt mit den archäologischen Beobachtungen, ermöglichen es, die Funktionsweise des Schmelzofens (chap. 6) zu begreifen. Trotz der stark gestörten Überreste des Ofens erlauben uns die gewonnenen Erkenntnisse, das thermische System aus einem Schmelzofen und zwei anschliessenden Kühltöfen zu rekonstruieren.

*Übersetzung Rudolf Zwahlen, ADB*

### Summary

The vast glasshouse site of Court, Pâturage de l'Envers was excavated between 2000 and 2004 within the context of the A16 Transjurane motorway works. A first volume devoted to the archaeological remains was published in 2010. Focusing on the technical and technological aspects of the glass production, this volume is the second monograph in a series of four. Two volumes of commented catalogues will complete this substantial publication.

On the 27<sup>th</sup> of September 1699, the prince-bishop of Basel leased a vast forest to a group of glassmakers for fifteen years, some of which being already active in the region and seeking to establish a new forest factory in Court. Once the contract was in hand, the glassmakers could deforest the necessary space for the plant: construction of the hall, houses and barracks that would shelter the glassmakers and their families, as well as their labourers and woodcutters. The production at Court did not last beyond 1714. The region holds siderolithic deposits, rich in quartz sand and high quality fireclay. The exploitation of the latter probably dates back many centuries. Historical documents mention an abundant supply of clay from Sornetan in 1701–1702. These were probably intended for the construction of furnaces that could not be lit until 1702. Meanwhile, the glassmakers probably continued to use the furnaces of the Court, Sous les Roches glasshouse, located less than 1 km away, even if their lease was expired.

Glassmakers consumed large quantities of wood, especially for the ash production. The

addition of ash to the composition lowers the melting point of the sand. The volume of timber required depended on the type of furnace used, the duration of the production campaigns, but also on the quality of the selected sands. For the Pâturage de l'Envers glasshouse, it is estimated that it devoured nearly 11 ha per year, one third of the amount cut being used for the ash production alone (chap. 2 and 4). These values correspond well with those known from other contemporary glasshouse sites. The glass chemistry is determined to a large extent by the minerals contained in the wood ash, which in turn reflects the substrate on which the trees had grown.

The excavation of the site has yielded many fragments of finished glass, but also production waste and scraps. Rarely studied to date, they were given special attention. The statistical data delivers interesting insights into the range of products, particularly of the colours produced (chap. 3). Over 75 % of the production consists of ordinary glass with a green tint. Window glass occupies an important place in terms of fragments, with nearly 50 % of the corpus and a little more than 30 % of the weight. Crown glass (fr. *cive*) is still mass-produced, whereas a small-scale production of flat glass, using the technique of cylinder blown sheet, appears. The making of glass discs (fr. *verre en calotte* / dt. *Tellerscheiben*) is also attested. In accordance with other small traditional glasshouses, known as *menu verre*, the Pâturage de l'Envers site strives to offer a broad range of products. Thus, apart from window glass, we find pharmaceutical containers (phials, jars and a variety of bottles) and drinking glasses, especially beakers with moulded decoration (circular shaped warts or drops) and stemmed glasses with hollow balusters of Venetian inspiration. At the current stage of the on-going study, it becomes apparent that the drinking glasses betray Germanic influences on the one hand (warts-shaped moulded decoration, filigree glass bases and stems) and French on the other (hollow baluster stems). They are mostly of an ordinary type, that is to say green. Colourless productions represent less than a quarter of the identified tableware. Potbellied wine bottles, though few, were also found on the site, but their local manufacture remains uncertain.

An extensive program of chemical analyses carried out under the direction of W. B. Stern at the University of Basel focused on 341 samples, including 199 glasses. The results showed two glass groups which differ not only in colour, but also in chemical composition (chap. 4). The first corresponds to the traditional production of “ordinary glass”, the German *Waldglas*, whose colour ranges from pale green to dark green depending on the thinness of the walls. These potassium-calcium glasses are produced from a composition of sand and simple ash. The second group encompasses products which are nearly colourless, sometimes retaining yellowish or greyish glints. Compared to the first group, they have particular chemical characteristics: low phosphate, iron and aluminium contents with high potassium levels. According to Y. Gerber and W. B. Stern, this specific composition betrays the use of potash. The glassmakers extracted this potassium rich eluate by decanting and filtering ash. It was added in dried form to the glass composition as flux. The insoluble tinting minerals remained in the ash filtration residue, which could not be used to produce colourless glass. However, the potassium enriched glasses are also characterised by a generally higher manganese rate. The colourlessness of the glass is primarily conditioned by the pureness of the raw materials entering the composition, but the intentional addition of manganese could reduce a possible green tint. The discovery of manganese-rich ore fragments on the site corroborates this hypothesis. Although the study of the site’s products is not complete (volume 4, forthcoming), it appears that the colourless glass, more demanding in terms of processing ingredients such as potash, represented only a negligible fraction of the production. It was reserved for higher quality tableware.

The analysis of the melting furnace components (chap. 5) shows the use of two distinct types of bricks: some in reddish-brown terracotta, others in yellow-beige fireclay. The first, less durable and poorly adapted to the intense heat of a reverberatory furnace, were used in the construction of the annealing arches on either sides of the melting furnace. They are moulded and of a parallelepiped or *voussoir* shape. Specimens collected reveal different formats. Because of their sandy and kaolinitic

composition, the bricks of the second group had a refractory character suited to the making of the benches and the roof of the melting furnace. Like the bricks of the first group, they are moulded and mostly of parallelepiped shape, but can sometimes be a flat bar with rounded corners.

The archaeometric study of the bricks, roof elements and crucibles was carried out by G. Eramo as part of a doctoral thesis at the University of Fribourg. It revealed the excellent thermic qualities of the refractory material used. The previously published results are summarized and incorporated into various chapters. The formation of crystalline phases characterising high temperatures, such as cristobalite and mullite, indicate very high temperatures, ranging from 1370 to 1500° C depending on the area, were reached at least from time to time in the melting furnace of *Pâturage de l’Envers*. This goes well beyond what was commonly assumed by the scientific community. These results demonstrate the extraordinary heat capacity of furnaces at the very end of the 17<sup>th</sup> century, but also the technical skills of the glass craftsmen.

Refractory bricks, crucibles and the clay serving as recoating of the internal furnace walls showed a uniform structural and mineralogical composition. The comparison of these data with samples taken in siderolithic clayey sand deposits from the Vallée de Tavannes and the Petit-Val permits to suggest the Monible sector as the probable supply source of our glassmakers. This hypothesis was corroborated by historical documents which mention the delivery of refractory clay from Sornetan, the neighbouring village. As for common bricks, they were probably made from clay extracted on the very site of the glasshouse.

Archaeometric data from the glasses, refractories (bricks, furnace walls and crucibles) and raw materials (sand, ash) coupled with archaeological observations lead to a better understanding of how the melting furnace functioned (chap. 6). Despite poorly preserved furnace remains, it is possible to propose a reconstruction of the thermal system of the melting furnace and the adjoining arches in which the finished glasses were annealed.

*Transl. Lara Tremblay and Regula Gubler, ADB*



# Catalogue

Laetitia Kaiser

Au sein du Service archéologique du canton de Berne, les bases de données centrales ont été dès l'origine établies en allemand. Les termes et les abréviations usuelles pouvant paraître étranges ou incompréhensibles aux lecteurs non germanophones, nous avons pris le parti de les traduire dans la mesure du possible. La liste de correspondances ci-dessous facilitera au besoin la localisation des objets dans les bases de données du Service.

Abréviations utilisées :

ind. : individu

cont. : contexte, correspond au FzNr. Allemand. Dans l'énumération de plusieurs contextes, le principal est le premier mentionné.

pos. : position, correspond à couche ou unité stratigraphique

éch. : échelle

L. : longueur

l. : largeur

h. : hauteur

In1 : grand côté de l'intrados

In2 : petit côté de l'intrados

Ex1 : grand côté de l'extrados

Ex2 : petit côté de l'extrados

## Grands creusets

### Secteur A, halle verrière et crassiers (Planche 1)

- 1 Grand creuset. Profil complet. Bord : plat, fin, aminci et arrondi côté ouvreau. Paroi intérieure crème tachetée de brun; côté ouvreau, fines coulures blanches et concrétions calcaires; côté foyer, résidus de verre vert. Paroi extérieure : vitrification blanc-vert, traces de contact avec creuset voisin; côté ouvreau, coulures blanches et bleues. Fond intérieur : quelques résidus de verre vert. Fond extérieur crème, présence de stries parallèles (traces de fabrication ?); centre et bord : vitrification importante vert-brun. Surface de pose concave. Pâte grise, vacuoles. • 100 tessons; environ 60 % conservé. • Cont. 78159, 78151, 78154, 78160. Secteur A, zone 10, pos. A203. Ind. 4.
- 2 Grand creuset. Profil complet. Bord : plat, fin, très aminci et évasé côté ouvreau. Paroi intérieure crème, coulures blanches et roses, croûte blanchâtre côté ouvreau, fissure perforante vitrifiée. Paroi extérieure : vitrification vert clair, nombreuses fissures vitrifiées bleues, coulures blanches; traces de contact avec le creuset voisin. Fond intérieur : complet, résidus de verre vert. Fond extérieur : surface de pose concave. Pâte grise, très cuite, vacuoles, vitrifications internes. • 102 tessons; environ

80 % conservé. • Cont. 78240, 78159. Secteur A, zone 10, pos. A2. Ind. 5.

- 3 Grand creuset. Bord : horizontal, crénelé, arrondi côté ouvreau. Paroi intérieure vacuolée, vitrification rose-bleu-crème; côté ouvreau, coulure blanche, largeur env. 100 mm. Paroi extérieure : vitrification vert clair, coulures roses marbrées blanc. Nombreux sillons. Fond intérieur : résidus de verre vert foncé sous fine couche blanchâtre. Fond extérieur : vitrification cloquée. Pâte gris-beige, vacuoles. • 63 tessons. • Cont. 75212, 75208, 75213, 75238. Secteur A, zone 4.4, pos. A5b. Ind. 2.

### Secteurs A (fin) et C, surface 7 (Planche 2)

- 4 Grand creuset. Profil complet. Bord : plat, fin, s'affine côté ouvreau. Paroi intérieure crème mouchetée de brun, coulures blanches côté ouvreau. Paroi extérieure verte, coulures blanches et bleues, fissures. Fond intérieur très fragmentaire, résidus de verre vert, traces d'écoulement consécutives à l'éclatement du creuset. Fond extérieur : vitrification intensive. Surface de pose concave. Pâte grise à gris-rose, vacuoles. • 93 tessons. • Cont. 78159. Secteur A, zone 10, pos. A203. Ind. 3.
- 5 Grand creuset. Profil complet. Bord plat. Paroi intérieure crème, taches noires. Paroi extérieure peu vitrifiée, crème, taches noires, coulures vertes et blanches marbrées de bleu; traces de lissage. Fond : épais, résidus de verre turquoise sous couche blanchâtre, Fond extérieur : cloqué, gris. Pâte beige-jaune, nuances orangées, vacuoles. Exemplaire ayant subi une défaillance ? • 23 tessons. • Cont. 88146. Secteur C, surface 7, pos. C200. Ind. 29.
- 6 Grand creuset. Profil complet. Bord : horizontal, aminci du côté de l'ouvreau. Paroi intérieure blanc-rose, surface très rugueuse. Niveau de remplissage visible. Paroi extérieure : vitrification de couleur verte, nombreuses anfractuosités vitrifiées, coulures blanches et roses, sillons verticaux marqués. Fond intérieur : épais avec importants résidus de verre turquoise mat. Fond extérieur entièrement vitrifié, rugueux, rose-blanc. Surface de pose concave. Pâte jaune-gris, vitrifications internes. • 62 tessons; environ 85 % conservé. • Cont. 88127, 86906. Secteur C, surface 7, pos. C219. Ind. 15.

### Secteur C, habitation 2 (Planche 3)

- 7 Grand creuset. Profil complet. Bord horizontal. Paroi intérieure : vert-beige; côté ouvreau, grande tache blanchâtre. Paroi extérieure blanche, profondes fissures vitrifiées vertes; côté ouvreau coulures brunes et dépôt blanchâtre. Fond intérieur : épais résidu de verre vert-brun. Fond extérieur blanc, petites fis-

sures vitrifiées vertes. Surface de pose concave. Pâte gris-jaune, vacuoles, vitrifications internes. • 69 tessons; environ 40 % conservé. • Cont. 70188, 86906, 70195, 77036. Secteur C, habitation 2, pos. C2. Ind. 12.

- 8 Grand creuset. Profil complet. Bord aminci et évasé. Paroi intérieure blanche et mate, coulures à proximité du bord. Paroi extérieure avec nombreuses fissures vitrifiées, couleurs vert-blanc et taches brunes. Coulures blanches. Fond intérieur : résidus de verre (épaisseur 16 mm) de couleur brun cuivre avec reflets verts surmontés par une couche blanchâtre. Fond extérieur : forte vitrification, cloqué. Pâte grise claire, vacuoles. • 61 tessons. • Cont. 77038, 86906, 77036, 81942. Secteur C, habitation 2, pos. C1. Ind. 11.
- 9 Grand creuset. Profil complet. Bord : horizontal et épais. Paroi intérieure verte avec taches brunes. Paroi extérieure crème-vert, coulures brunes, certaines parties peu vitrifiées. Fond intérieur : vitrification verte mouchetée de brun, aminci et percé par verre en fusion. Fond extérieur : intense vitrification brun-ocre, cassante, vacuoles. • 99 tessons; environ 90 % conservé. • Cont. 70195, 86907, 86906. Secteur C, habitation 2, pos. C2. Ind. 13.

### Secteurs C (fin), D et F : habitations 1 et 2, four F49 (Planche 4)

- 10 Grand creuset. Bord, paroi et fond. Bord épais, Paroi intérieure blanc-beige, plus foncée dans zone attenante au fond. Paroi extérieure blanche avec coulures brunes et croûte blanchâtre. À proximité du bord, vitrification verte. Fond intérieur brun-gris, résidus de verre vert. Fond extérieur beige-jaune, croûte blanchâtre et magma de verre émeraude-gris foncé. Surface de pose concave. Pâte gris-jaune, fentes de retrait et petites vacuoles. • 72 tessons. • Cont. 77038, 86906, 70188, 77037. Secteur C, habitation 2, pos. C1. Ind. 8.
- 11 Grand creuset. Profil complet. Bord horizontal. Paroi intérieure gris-blanc, partie inférieure crevassée et marbrée de brun-rouge. Paroi extérieure crème-vert, peu vitrifiée, quelques coulures blanches, traces de lissage visibles. Fond intérieur peu épais, résidus de verre vert. Fond extérieur crème, strié. Surface de pose concave. Pâte jaune-orange à grise, vacuoles. • 99 tessons; environ 60 % conservé. • Cont. 70168. Secteur F, pos. F8. Ind. 17.
- 12 Grand creuset. Profil complet. Bord horizontal; côté ouvreau, lèvre aminci et évasée. Paroi intérieure gris-beige, taches cuivrées; sous lèvre côté ouvreau, croûte blanchâtre.

Niveau de remplissage visible. Paroi extérieure vert-beige, nombreuses petites vacuoles, profonds sillons, quelques coulures rose-bleu; paroi latérale, trace blanchâtre et résidus d'argile réfractaire collée sur vitrification (trace de contact avec creuset voisin). Fond intérieur: épais résidu de verre vert sous fine couche blanchâtre. Fond extérieur: vitrification blanc-vert. Surface de pose concave. Pâte grise-orangée, vacuoles, vitrifications internes. • 67 tessons. • Cont. 81325, 81320. Secteur D, habitation 1, pos. D11. Ind. 16.

## Petits creusets

### Secteur C, habitation 2 (Planche 5)

- 13** Petit creuset. Profil complet. Bord légèrement rentrant, lèvre aplanie. Paroi intérieure vert clair à brun-rouge. Paroi extérieure vert clair, coulure brun-noir. Fond intérieur: résidus de verre brun-rouge (fond et paroi). Trace d'écoulement suite à la rupture du récipient. Pâte beige-jaune. Similaire à l'ind. 51. • 3 tessons. • Cont. 86906. Secteur C, habitation 2, pos. C21. Ind. 52.
- 14** Petit creuset. Profil complet. Bord à lèvre aplanie. Paroi intérieure vert clair à brun, résidus de verre foncé. Paroi extérieure vert clair à brun. Fond intérieur: résidus de verre foncé (brun-rouge). Fond extérieur crème-orange. Pâte blanc-jaune. Similaire à l'ind. 52. • 6 tessons; environ 40 % conservé. • Cont. 86906, 86965. Secteur C, habitation 2, pos. C21. Ind. 51.
- 15** Petit creuset. Profil complet. Bord rentrant, lèvre arrondie, amincie. Paroi intérieure blanchâtre, quelques taches vertes non vitrifiées. Paroi extérieure beige-rose, non vitrifiée. Fond intérieur: résidus ferrugineux. Fond extérieur beige, peu vitrifié. Surface de pose plate. Pâte orange-brun. • 1 tesson. • Cont. 70187. Secteur C, habitation 2, pos. C7. Ind. 53.

### Secteur A, halle verrière et crassiers

- 16** Petit creuset. Bord rentrant, lèvre arrondie. Paroi intérieure verte. Paroi extérieure: vitrification crème, coulures vert-jaune. Fond intérieur: résidus de verre foncé (rouge ou bleu). Fond extérieur: vitrification vert-jaune et tache de verre rouge et bleue. Pâte blanche à grise, fissures et vitrification internes. • 2 tessons. • Cont. 78178, 78179. Secteur A, zone 9, pos. A166. Ind. 47.
- 17** Petit creuset. Profil complet. Bord à lèvre aplanie. Paroi intérieure bleu-gris. Paroi extérieure crème, encroûtement brun violacé. Fond intérieur: résidus de verre foncé (violet ou bleu). Fond extérieur: croûte grisâtre, taches roses et bleues. Pâte grise, vacuoles. • 1 tesson. • Cont. 78179. Secteur A, zone 9, pos. A190a. Ind. 48.
- 18** Petit creuset. Bord à lèvre arrondie. Paroi intérieure verte. Paroi extérieure crème-vert. Fond extérieur vert. Pâte jaune-beige. • 2 tessons. • Cont. 78252. Secteur A, zone 9, pos. A166. Ind. 50.

- 19** Petit creuset. Paroi, fond. Paroi intérieure brune. Paroi extérieure grise, peu vitrifiée. Fond intérieur: dépôt ferrugineux. Fond extérieur gris, peu vitrifié. Pâte grise, fissure traversante vitrifiée. • 1 tesson. • Cont. 75432. Secteur A, zone 2, pos. A10. Ind. 46.
- 20** Petit creuset. Bord à lèvre arrondie. Paroi intérieure: croûte mate de couleur crème, vacuoles. Paroi extérieure: croûte vitreuse crème-gris. Amorce de fond. Pâte gris-beige. • 1 tesson. • Cont. 77058. Secteur A, zone 4.4, pos. A30b. Ind. 40.
- 21** Petit creuset. Fond intérieur: résidus de verre vert sous croûte blanchâtre mate. Fond extérieur: croûte blanchâtre crevassée. Pâte: jaune-beige, vitrification interne. • 1 tesson. • Cont. 75529. Secteur A, zone 4.3, pos. A30a. Ind. 44.
- 22** Petit creuset. Paroi intérieure bleue mouche-tée de blanc, résidu de verre bleu. Paroi extérieure bleu cobalt. Pâte jaune. • 2 tessons. • Cont. 78287. Secteur A, zone 8, pos. A185. Ind. 49.

## Briques réfractaires

### Secteur A, halle verrière (Planche 6)

- 23** Brique parallélépipédique. Argile réfractaire, dégraissant siliceux. Angle arrondi: modelé à la main. • l. 159, h. 60 mm. • Cont. 75239. Secteur A, zone 4.2, pos. A54. Ind. 255.
- 24** Brique parallélépipédique. Argile réfractaire, dégraissant siliceux. Trace de moulage/modelage; un angle arrondi. • l. 116, h. 40 mm. • Cont. 75212. Secteur A, zone 4.4, pos. A5b. Ind. 230.
- 25** Brique parallélépipédique. Argile réfractaire, dégraissant siliceux. Trace de mortier de montage. • h. 61 mm. • Cont. 75238. Secteur A, zone 4.2, pos. A54. Ind. 251.
- 26** Brique parallélépipédique. Argile réfractaire, dégraissant siliceux. Trace de moulage/modelage, trace de mortier de montage: un angle arrondi. Stries sur une face. • l. 132, h. 46 mm. • Cont. 75212. Secteur A, zone 4.4, pos. A5b. Ind. 219.

### Secteur A, halle verrière et crassiers (Planche 7)

- 27** Brique parallélépipédique. Argile réfractaire, dégraissant siliceux. Trace de moulage/modelage; un angle arrondi. • l. 110, h. 55 mm. • Cont. 75212. Secteur A, zone 4.4, pos. A5b. Ind. 217.
- 28** Brique parallélépipédique. Argile réfractaire, dégraissant siliceux. Surface scorifiée, trace de mortier de montage. Dégraissant siliceux + déchets vitreux. Traces de coulure de verre. • h. 66 mm. • Cont. 81332. Secteur A, zone 13, pos. A250. Ind. 168.
- 29** Brique parallélépipédique. Argile réfractaire, dégraissant siliceux. Surface scorifiée, trace de mortier de montage. Brique: dégraissant siliceux + calcaire; mortier de montage: dégraissant siliceux + déchets vitreux. • l. 80, h. 55 mm. • Cont. 81332. Secteur A, zone 13, pos. A250. Ind. 165.
- 30** Brique parallélépipédique. Argile réfractaire, dégraissant siliceux. Surface scori-

fiée. Traces de coulure de verre. • l. 76, h. 54 mm. • Cont. 81332. Secteur A, zone 13, pos. A250. Ind. 164.

- 31** Brique parallélépipédique. Argile réfractaire, dégraissant siliceux. Surface scorifiée, trace de mortier de montage. Traces de coulure de verre. • h. 52 mm. • Cont. 81332. Secteur A, zone 13, pos. A250. Ind. 170.
- 32** Plaquette. Argile réfractaire, dégraissant siliceux. Petite plaquette en réfractaire. • h. 11 mm. • Cont. 78154. Secteur A, zone 10, pos. A203. Ind. 2113.

## Briques et éléments en terre cuite

### Secteur A, halle verrière et crassiers (Planche 8)

- 33** Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. Empreintes de végétaux à la surface de la brique. • L. 204, l. 107, h. 87 mm. • Cont. 75447. Secteur A, zone 4.4, pos. A4d. Ind. 205.
- 34** Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. Stries sur une face. Empreintes de végétaux dans la matrice. • L. 211, l. 76, h. 72 mm. • Cont. 75212. Secteur A, zone 4.4, pos. A5b. Ind. 210.
- 35** Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. Empreinte de végétaux, traces de doigt. • L. 197, l. 105, h. 88 mm. • Cont. 78280. Secteur A, zone 9, pos. A175. Ind. 185.
- 36** Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. • L. 165, l. 80, h. 76 mm. • Cont. 78280. Secteur A, zone 9, pos. A175. Ind. 177.
- 37** Plaquette. Argile commune, dégraissant micacé. Petite plaquette indéterminée en argile. Traces de feu. • h. 11 mm. • Cont. 81332. Secteur A, zone 13, pos. A250. Ind. 2114.

### Secteur A, C et D: halle et habitations 1 et 3 (Planche 9)

- 38** Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. Taches noires dans la pâte rouge foncé. Une face de la brique est recouverte d'une fine couche de sable. • l. 125, h. 41 mm. • Cont. 75222. Secteur A, zone 4.4, pos. A5a. Ind. 191.
- 39** Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. Dégraissant micacé + calcaire. • l. 134, h. 48 mm. • Cont. 86942. Secteur C, habitation 3, pos. C103a. Ind. 299.
- 40** Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. • L. 132, l. 64, h. 64 mm. • Cont. 81325. Secteur D, habitation 1, pos. D11. Ind. 2066.

- 41 Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Trace de moulage/modelage. Empreintes de végétaux dans et sur la brique. • L. 115, l. 72, h. 70 mm. • Cont. 81325. Secteur D, habitation 1, pos. D11. Ind. 2046.
- 42 Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. Dégraissant micacé + déchets vitreux + calcaire. Empreintes de végétaux en surface. • L. 111, l. 89, h. 69 mm. • Cont. 81325. Secteur D, habitation 1, pos. D11. Ind. 2060.
- 43 Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. • L. 95, l. 69, h. 66 mm. • Cont. 81325. Secteur D, bat. 1, pos. D11. Ind. 2041.

**Secteur D et F : habitation 1 et four isolé (Planche 10)**

- 44 Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage, trace de mortier de montage. Empreintes de végétaux sur une surface. • L. 118, l. 81, h. 76 mm. • Cont. 81325. Secteur D, bat. 1, pos. D11. Ind. 2010.
- 45 Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage, trace de mortier de montage. L. 127, l. 85, h. 53 mm. • Cont. 81325. Secteur D, habitation 1, pos. D11. Ind. 2022.
- 46 Brique parallélépipédique. Argile commune, dégraissant micacé. Surface scorifiée. L. 120, l. 51, h. 46 mm. • Cont. 70166. Secteur F, pos. F55. Ind. 2004.
- 47 Brique claveau. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. Empreintes de végétaux en surface. • L. 118, l. 82, l. 64, Ex1 93, Ex2 81 mm. • Cont. 70166. Secteur F, pos. F55. Ind. 2000.
- 48 Brique claveau. Argile commune, dégraissant micacé. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. Empreintes de végétaux et de débris vitreux ou graveleux sur une face. • L. 115, l. 85, l. 51, Ex1 86, Ex2 84 mm. • Cont. 70166. Secteur F, pos. F55. Ind. 2001.
- 49 Brique claveau. Argile commune, dégraissant micacé. Trace de moulage/modelage. Sillon sur une face. • L. 111, l. 67, l. 50, Ex1 82, Ex2 74 mm. • Cont. 70167. Secteur F, pos. F8. Ind. 286.

**Secteur A, D et F : halle, habitation 1 et four isolé (Planche 11)**

- 50 Brique claveau. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage, trace de mortier de montage. • L. 106, l. 81, l. 65, Ex1 92, Ex2 74 mm. • Cont. 70169. Secteur F, pos. F48b. Ind. 277.
- 51 Brique claveau. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. Empreintes de végétaux en surface. • L. 116, l. 68, l. 59, Ex1 88, Ex2 79 mm. • Cont. 81325. Secteur D, habitation 1, pos. D11. Ind. 2031.
- 52 Brique claveau. Argile commune, dégraissant micacé avec déchets vitreux. Surface scorifiée, trace de moulage/modelage. Dégraissant micacé + déchets vitreux + calcaire. Empreintes de végétaux en surface. • L. 115, l. 74, l. 72, Ex1 92, Ex2 91 mm. • Cont. 81325. Secteur D, habitation 1, pos. D11. Ind. 2040.
- 53 Tuilette. Argile réfractaire, dégraissant à déchets divers. Surface scorifiée. Présence du trou de préhension. • h. 24 mm. • Cont. 75432. Secteur A, zone 2, pos. A10. Ind. 2149.
- 54 Tuilette. Argile réfractaire, dégraissant à déchets divers. Bord conservé; trou de préhension. Surface vitrifiée et croûte blanche. • h. 27 mm.; diamètre minimum 110 mm. • Cont. 75212. Secteur A, zone 4.4, pos. A5b. Ind. 2143.
- 55 Tuilette. Argile réfractaire, dégraissant à déchets divers. Surface vitrifiée et croûte blanche. Présence du trou de préhension. • Cont. 75570. Secteur A, zone 4.3, pos. A59b. Ind. 2146.

**Secteur A et I : halle, crassiers et habitation 4 (Planche 12)**

- 56 Tuilette. Argile réfractaire, dégraissant micacé; cœur gris, faces externes oranges rubéfiées. Trou de préhension polygonal. Deux fragments non-jointifs. • Cont. 81939. Secteur A, zone 7, non stratifié. Ind. 2193.
- 57 Tuile. Argile commune, dégraissant micacé. Trace de moulage/modelage. Gouttières; talon central conservé. Traces de feu. • l. 158, h. 11 mm. • Cont. 88448. Secteur I, bat. 4, pos. I51. Ind. 2076. • Datation : postérieur à la verrerie (après 1714).
- 58 Tuile. Argile commune, dégraissant micacé. Une partie de l'arête est conservée. Croûte blanchâtre. • h. 14 mm. • Cont. 78287. Secteur A, zone 8, pos. A185. Ind. 2083.
- 59 Tuile. Argile commune, dégraissant micacé. Dégraissant : micacé + grains ferrugineux. Gouttières; arête en partie conservée. • h. 15 mm. • Cont. 88448. Secteur I, habitation 4, pos. I51. Ind. 2077. • Datation : postérieur à la verrerie (après 1714).
- 60 Cône. Argile réfractaire. Cône dormant (posé au sol) ayant servi à enfoncer les culs des bouteilles de vin. Surface grisâtre, fissurée. Secteur A, zone 5, pos. A115. Ind. 17391.
- 61 Autres. Argile commune, dégraissant micacé. Petit fragment indéterminé. Terre cuite avec empreinte de clayonnage. • Cont. 77567. Secteur A, zone 5, pos. A19. Ind. 2112.

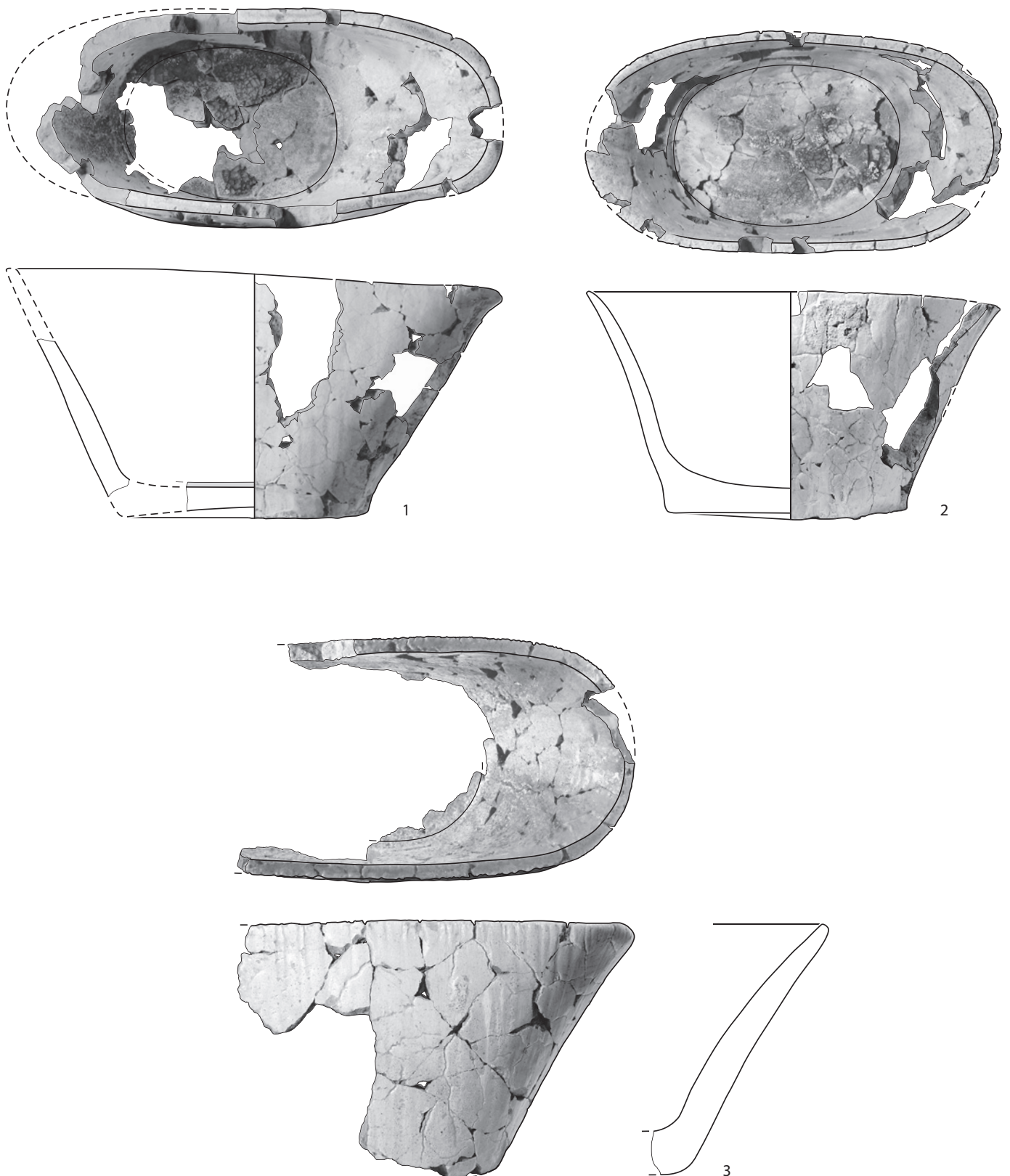
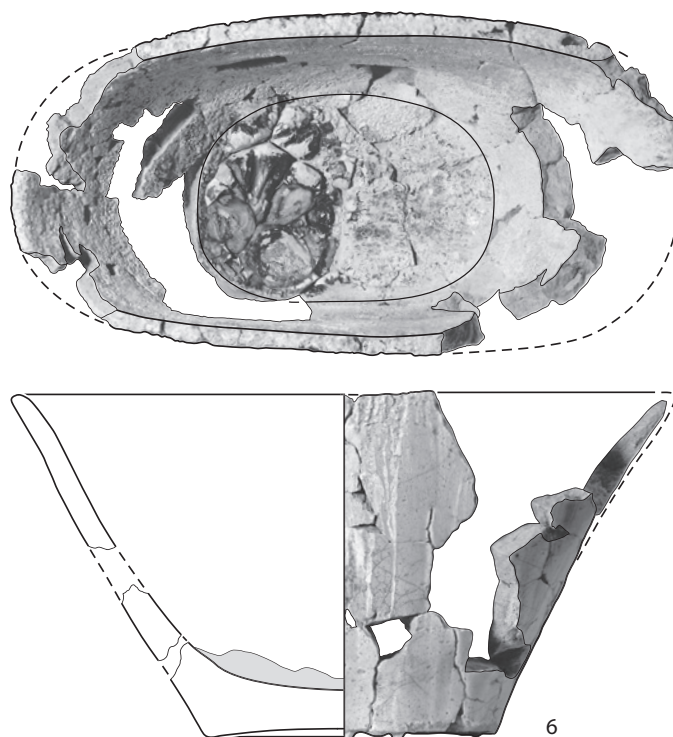
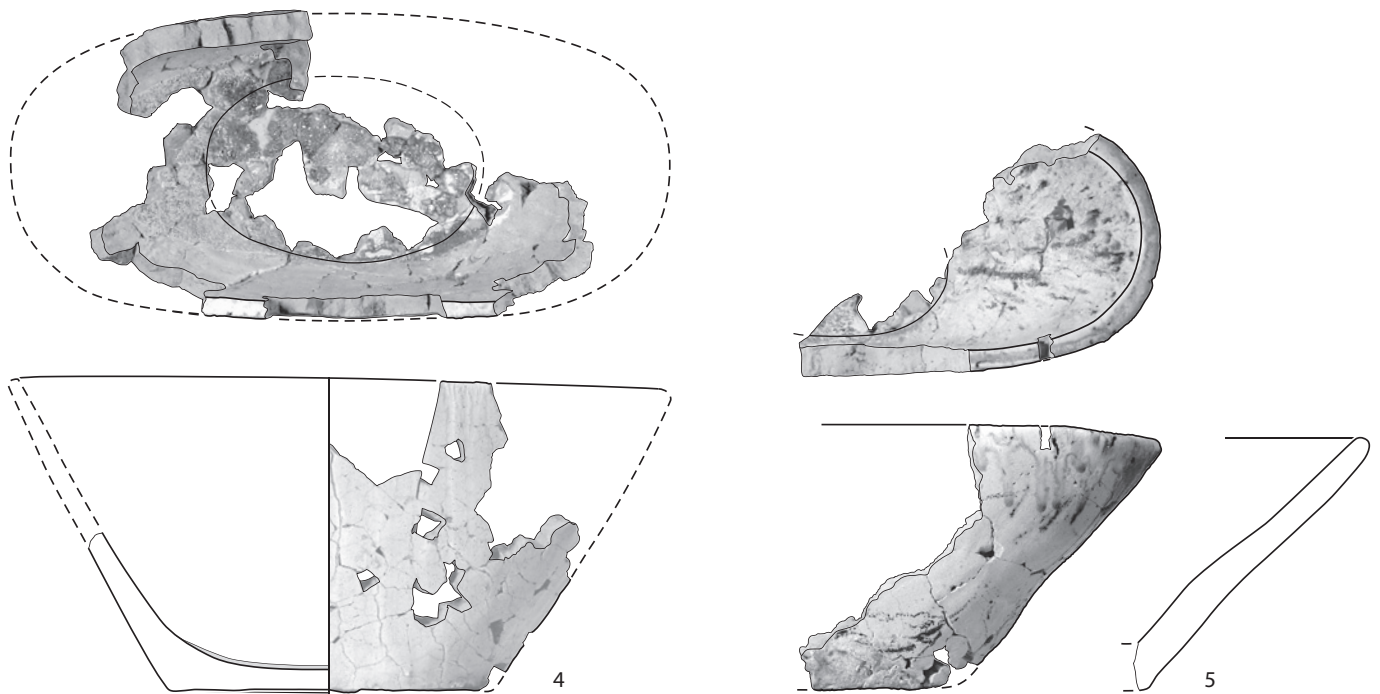
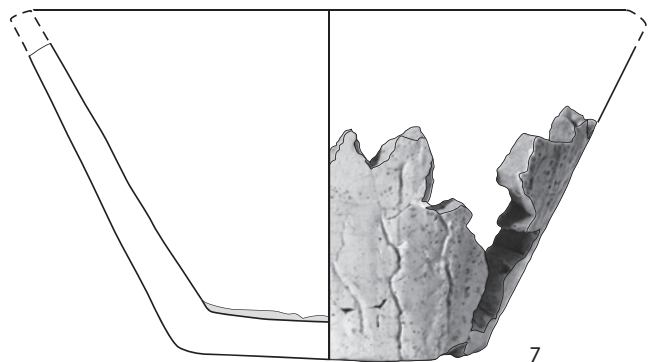
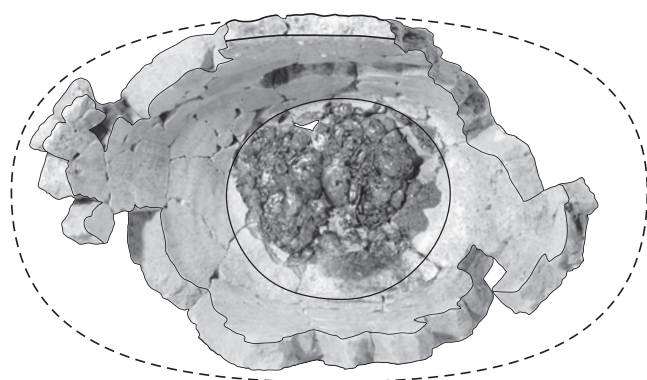


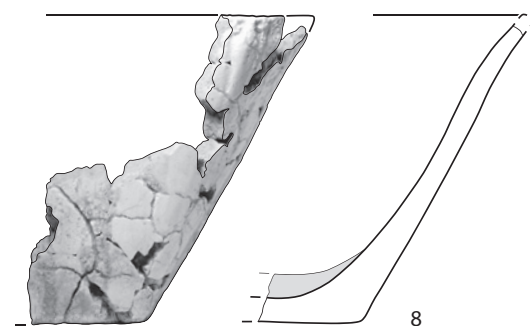
Planche 1. Court, Pâturage de l'Envers. 1-3 grands creusets. Ech. 1:6.



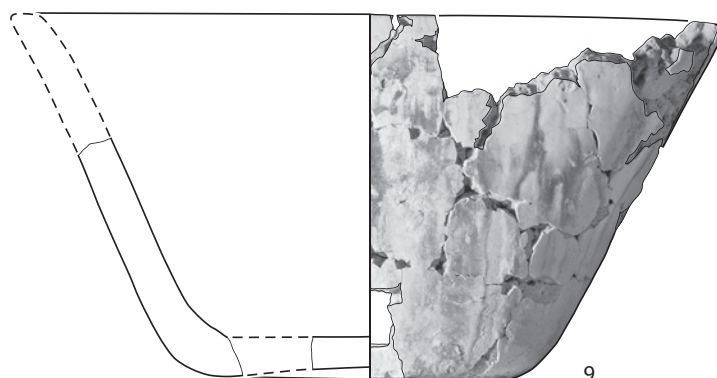
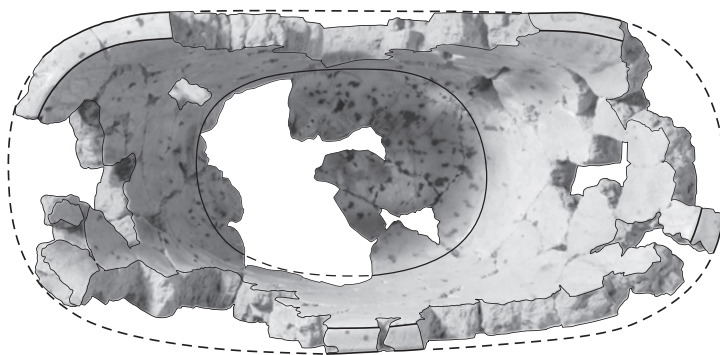




7



8



9

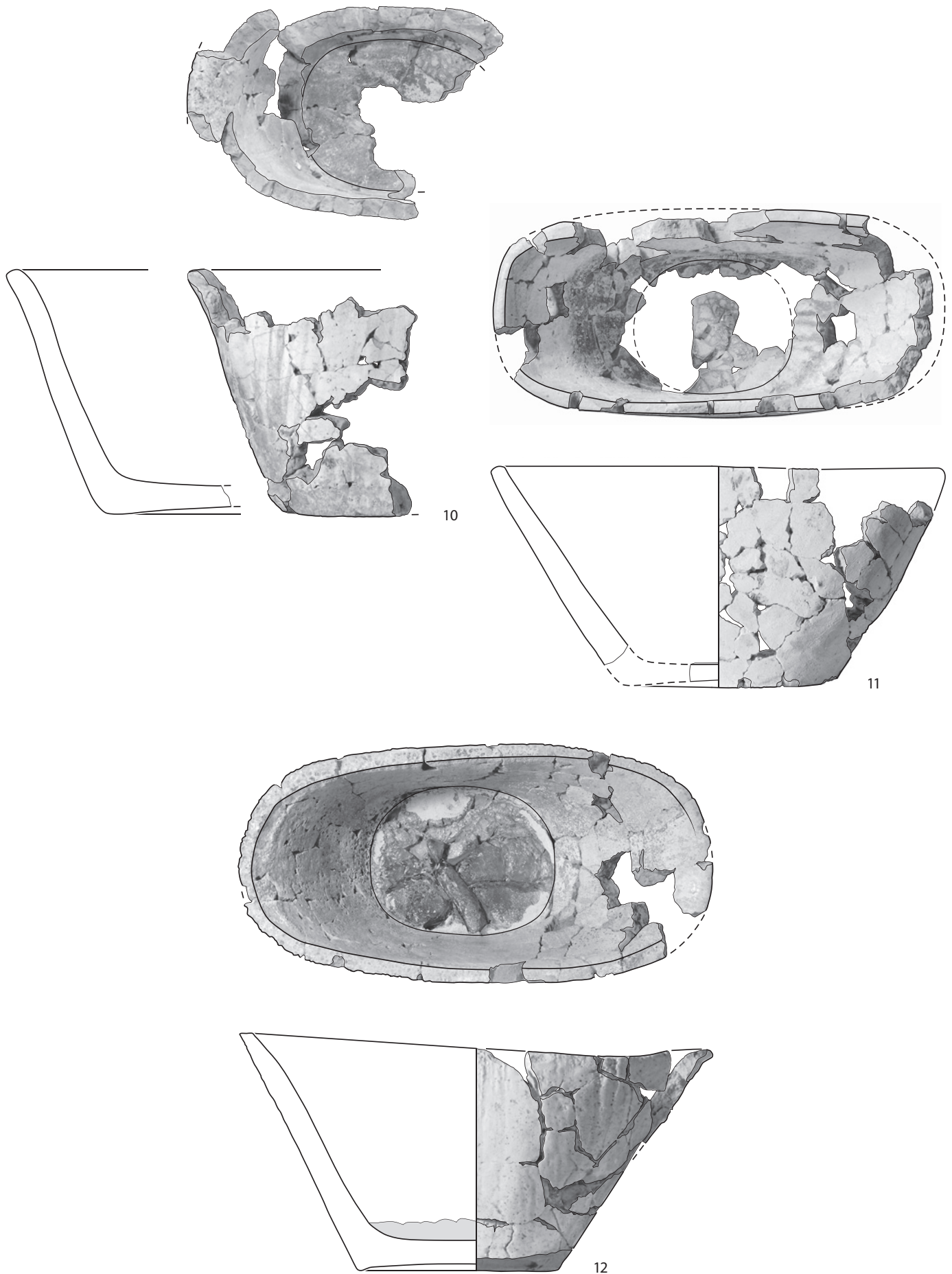
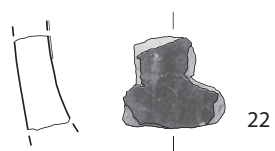
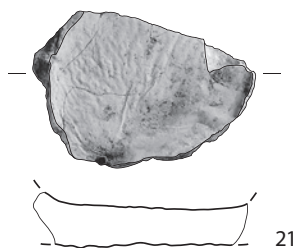
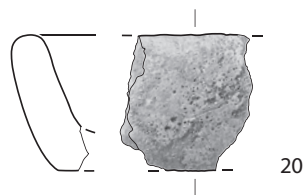
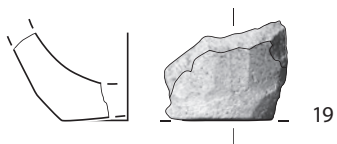
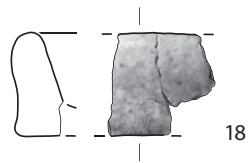
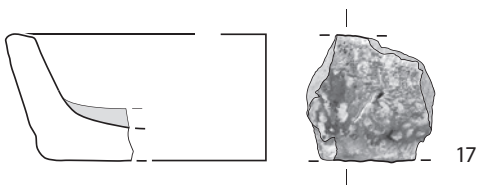
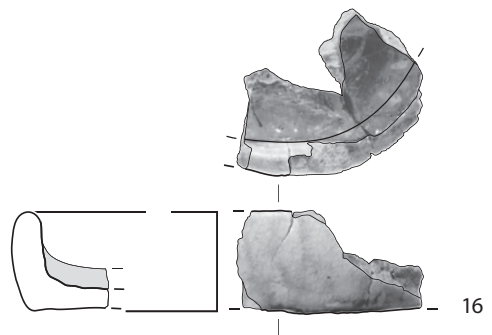
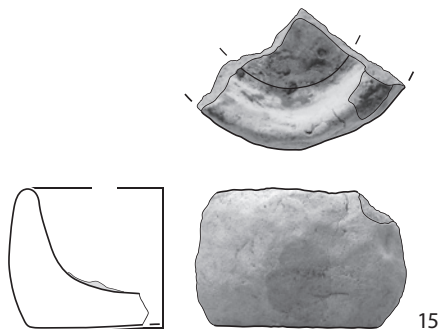
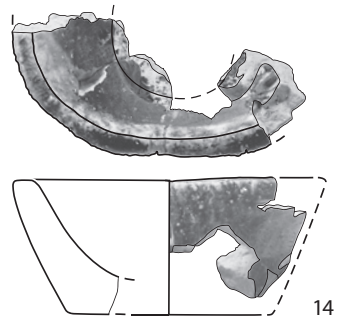
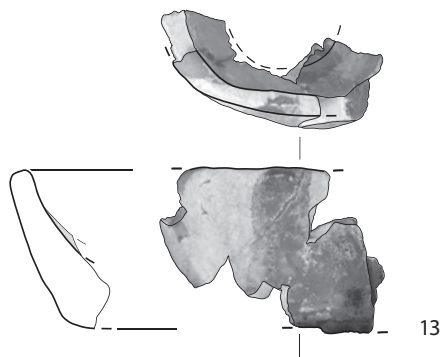
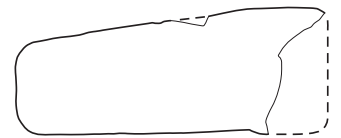


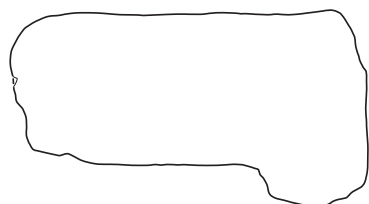
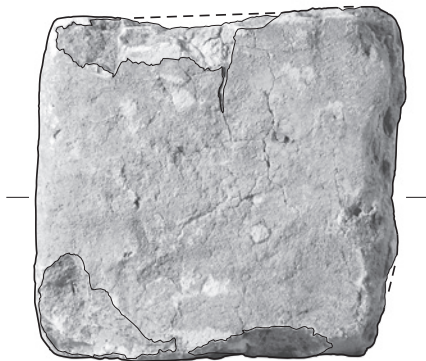
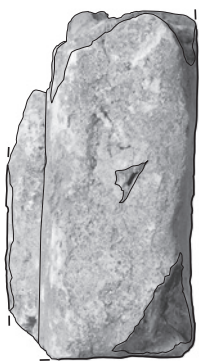
Planche 4. Court, Pâturage de l'Envers. 10-12 grands creusets. Ech. 1:6.



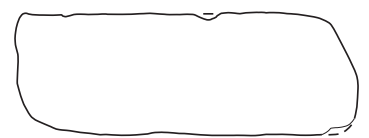




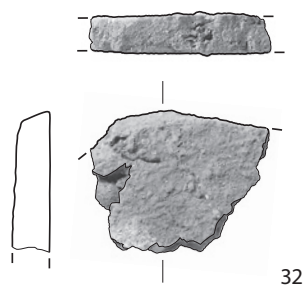
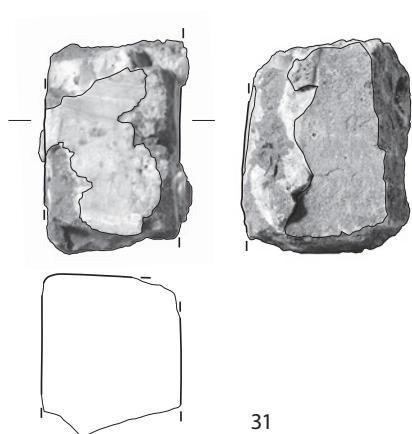
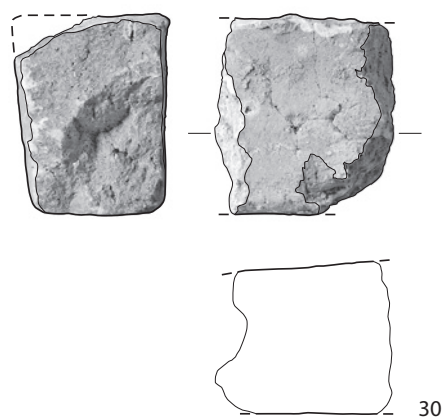
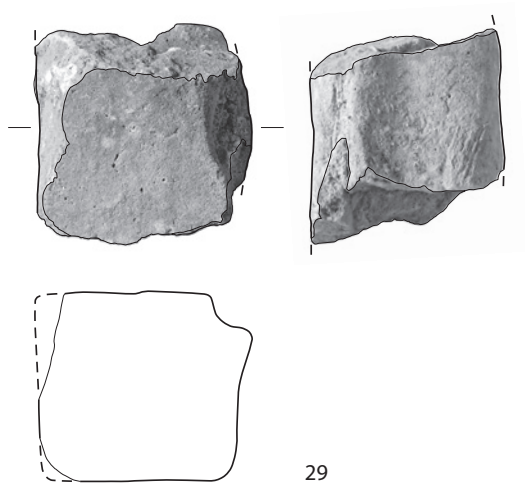
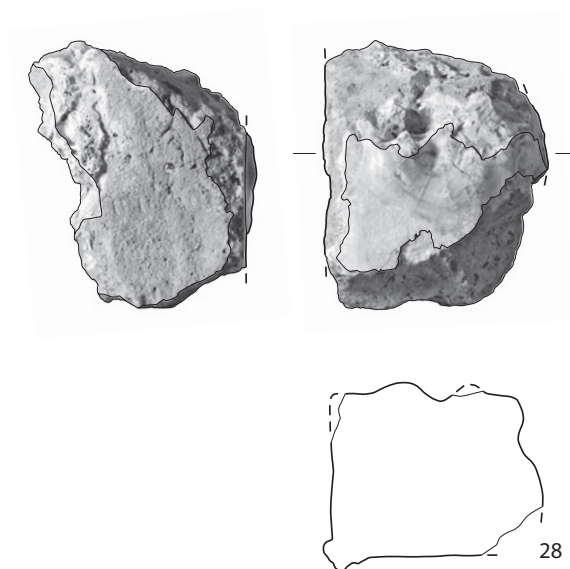
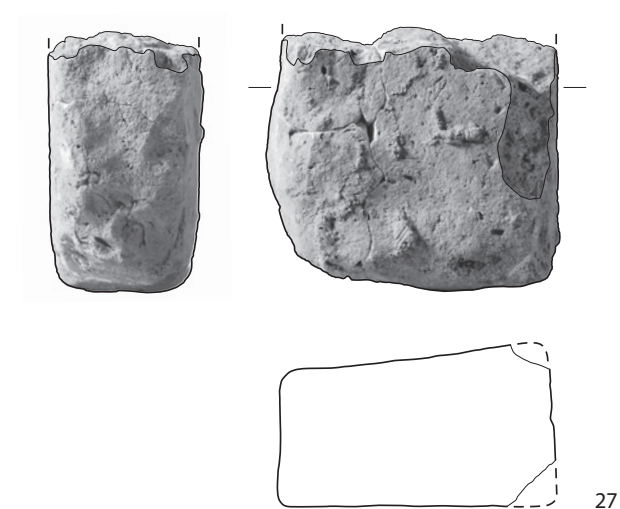
24



25



26



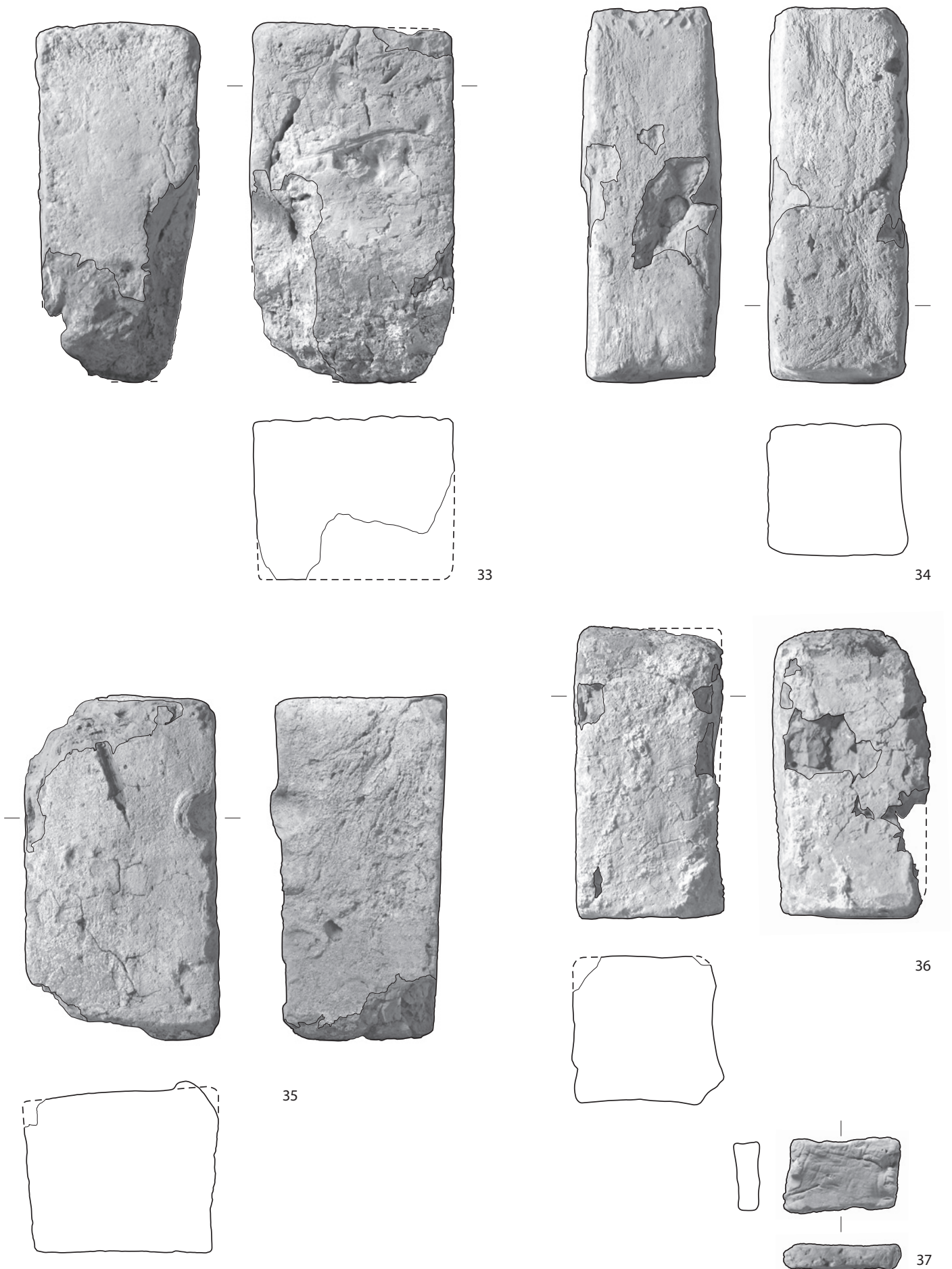
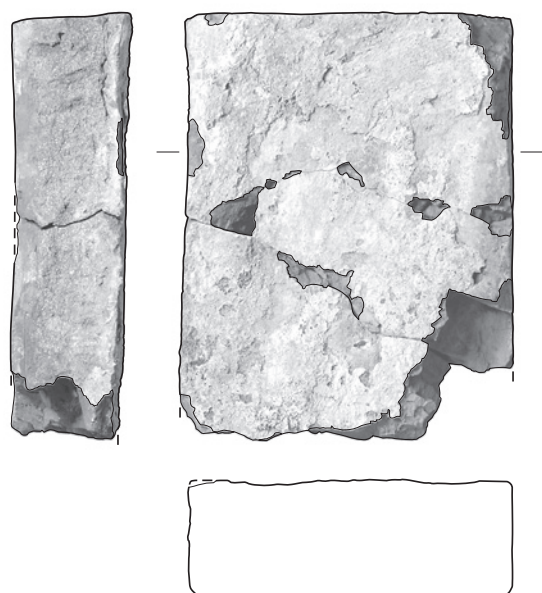


Planche 8. Court, Pâturage de l'Envers. 33-36 briques en terre cuite, 37 élément en terre cuite. Ech. 1:2.

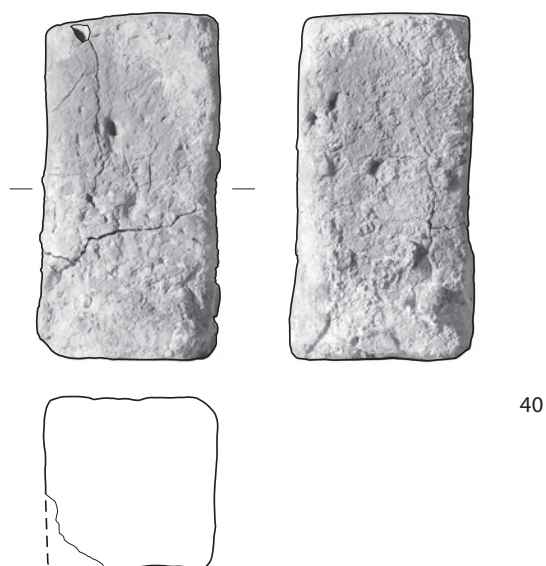




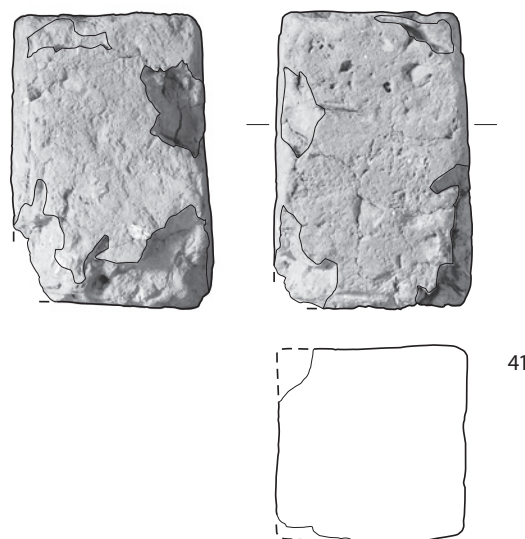
38



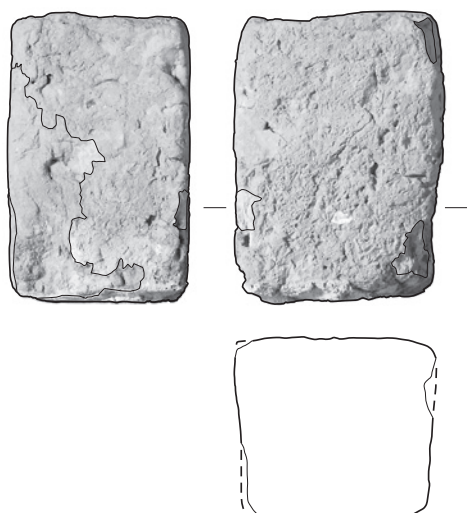
39



40



41

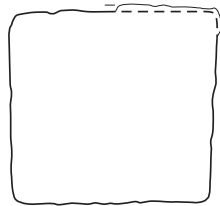


42

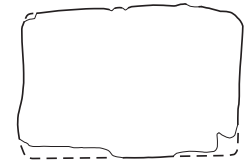
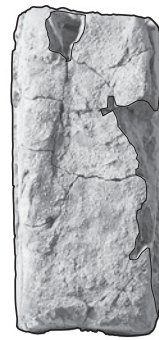


43

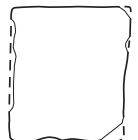




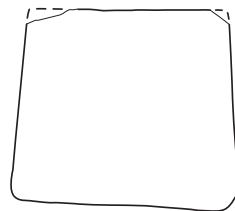
44



45



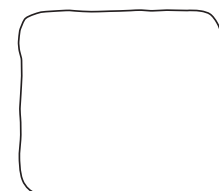
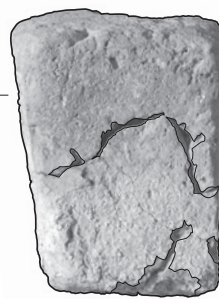
46



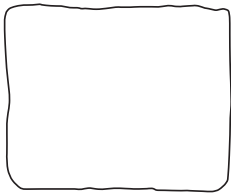
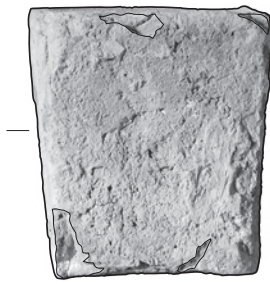
47



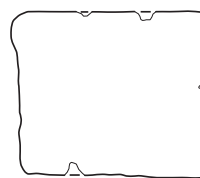
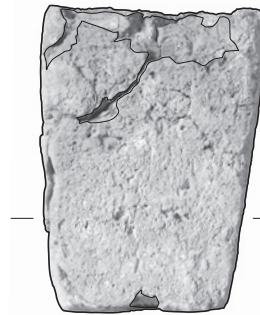
48



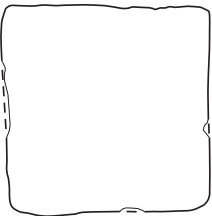
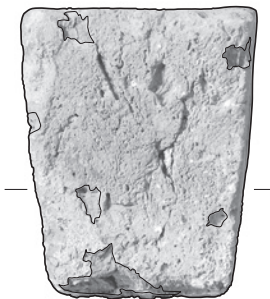
49



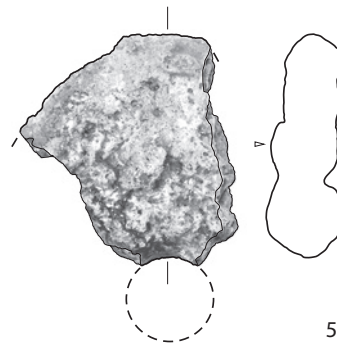
50



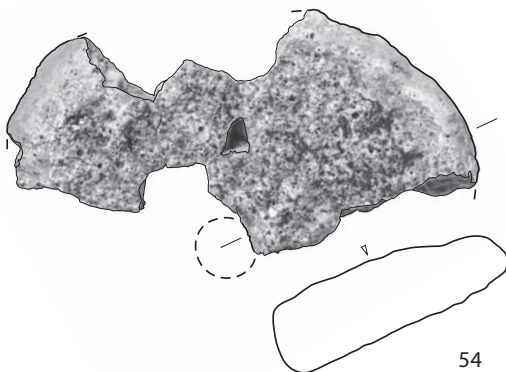
51



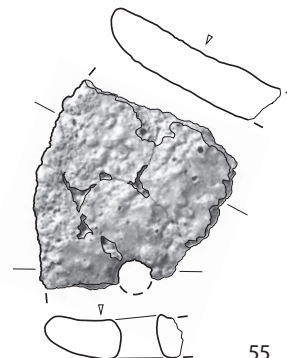
52



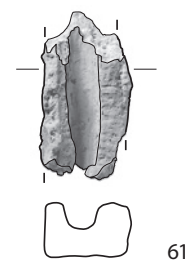
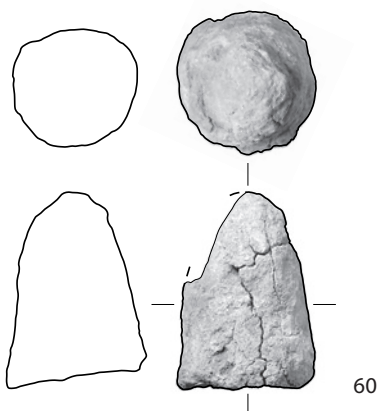
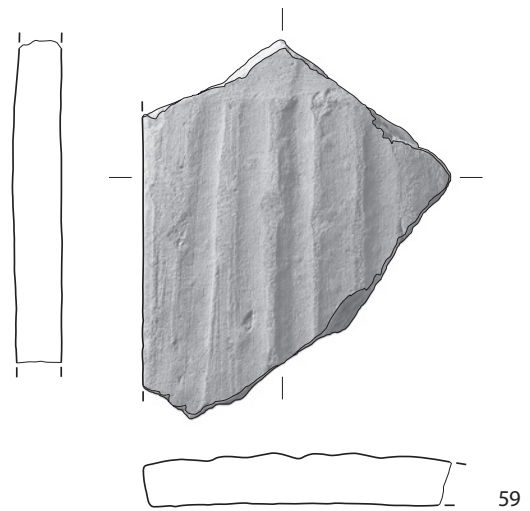
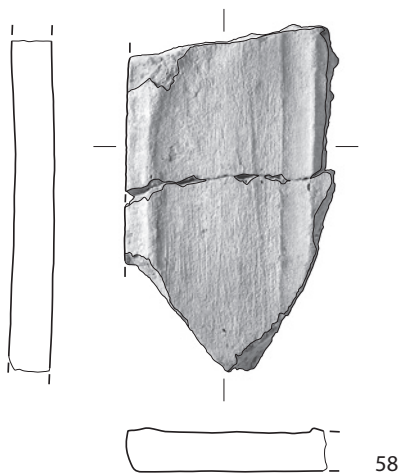
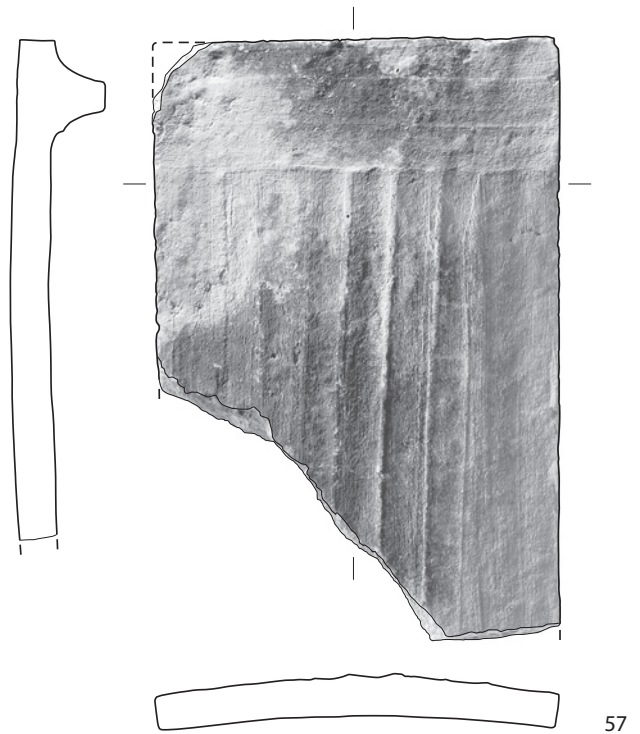
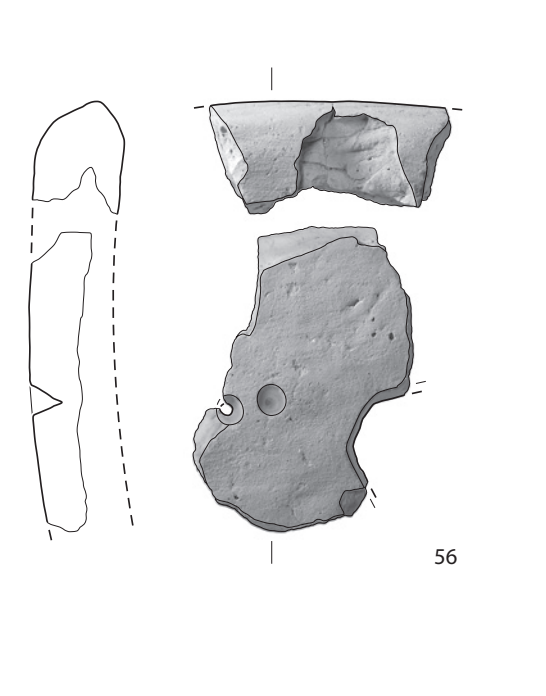
53



54



55







# Annexe 1

## Précis d'analyse statistique

Chris Lucianu

### Signalétique typographique

Les termes usuels en statistique ou en mathématique sont dénotés par un pointeur ➦ suivi du terme (ou de son acronyme) en *italiques*. Exemple: ➦ *PCA*

Les noms de procédures, packages, ou logiciels statistiques sont indiqués en **égyptiennes**, conformément à l'usage établi, notamment dans le cadre de la vaste littérature relative à l'*environnement* statistique et mathématique **R**. Exemple: ➦ **compositions**

Tant les termes techniques que les noms de procédures statistiques sont génériques, donc abondamment documentés dans les ouvrages de référence ainsi que dans les documentations en ligne sur le web, notamment sur les sites dédiés à **R** et dans les Wikipedia. À noter que la quasi-totalité de cette nomenclature est en anglais, suivant la pratique scientifique courante, même si certaines références sont également repérables en français ou en allemand.

### Énoncé du problème

①.A Les données géochimiques, comme toutes les données qui s'expriment en parts relatives à une unité totale constante, p. ex. en pourcentage ou en parties par million (➦ *ppm*), représentent un ensemble composé, une ➦ *composition*. Les valeurs numériques de telles compositions sont restreintes à l'ensemble des nombres réels positifs,  $\mathbb{R}_+$ . Cette contrainte ne manque pas de poser des problèmes intraitables lorsque des mesures telles les coefficients de corrélation ou de covariance sont calculées.

①.B En effet, les variables composantes d'une *composition* ne sont pas véritablement indépendantes au sens statistique du terme. Les variables indépendantes non-contraintes en statistique classique sont libres dans l'inter-

valle de  $-\infty$  à  $+\infty$ . Ce n'est pas le cas en *analyse compositionnelle*, où elles sont contraintes dans l'intervalle de 0 à 1. Une proportion accrue d'une composante implique automatiquement de moindres proportions pour toutes les autres: la somme des parties relatives d'une composition étant par définition une constante, l'unité (1 ou 100 %). Ces contraintes violent les prémisses des calculs statistiques conventionnels. On relève de fausses corrélations apparentes entre composantes majeures et mineures, tout comme de fausses corrélations négatives<sup>621</sup>. Exemple: la somme unitaire constante force au moins une covariance négative, et par cela au moins un coefficient de corrélation négatif. Si au moins un des coefficients de corrélation est automatiquement négatif, tous les autres ne sont pas libres de varier dans l'intervalle de +1 à -1, donc la prémisse d'indépendance des variables et des corrélations est violée. Il y a *clôture* (➦ *closure*)<sup>622</sup>, sans que la méthodologie statistique en tienne compte. Les mesures d'association et de corrélation sont automatiquement biaisées, la structure de covariance est faussée. Dans le cadre de la statistique conventionnelle, ces problèmes sont intraitables. Aitchison donne un aperçu cinglant des apories logiques et statistiques dues à l'ignorance de cette difficulté fondamentale<sup>623</sup>, ainsi que des arguments spécieux tentant de l'esquiver<sup>624</sup>.

①.C Historiquement, les statisticiens ont révélé ce problème dès le 19<sup>e</sup> siècle<sup>625</sup>, sans que les praticiens en prennent majoritairement conscience. De rares géologues comme Chayes<sup>626</sup> s'en sont alarmés. Mais ce n'est qu'à partir des années 1980 que l'esquisse d'une solution a été proposée, essentiellement par le mathématicien écossais John Aitchison<sup>627</sup>. À la suite de Aitchison, un groupe international se réunissant régulièrement à l'université de Girona, en Catalogne, a élaboré les bases conceptuelles modernes d'une approche

621 Aitchison 1986/2003, chap. 3.

622 Pawlowsky-Glahn/Egozcue 2006.

623 Aitchison 2008.

624 Aitchison/Barceló-Vidal/Pawlowsky-Glahn 2002 en réponse à Tangri/Wright 1993.

625 Pearson 1897.

626 Chayes 1960.

627 Aitchison 1981; Aitchison 1982; Aitchison 1983; Aitchison 1984; Aitchison 1986/2003.

pratique de l'analyse compositionnelle des données. Parmi ces contributions, il faut souligner les apports théoriques de Vera Pawlowsky-Glahn et J. J. Egozcue<sup>628</sup> et de leurs groupes, ainsi que les travaux de K. G. van den Boogaart et de R. Tolosana-Delgado<sup>629</sup>, qui ont élaboré un outil essentiel de traitement compréhensif des données compositionnelles dans le cadre de l'environnement d'analyse statistique  $\mathbb{R}$ , le package **compositions**.

## Introduction à CoDA (analyse compositionnelle des données)

**②.A** Terminologie : nous utilisons ici la terminologie définie par Aitchison et le groupe de Girona. Notamment, le terme *analyse compositionnelle des données*, en anglais : *Compositional Data Analysis*, est abrégé *CoDA*, selon l'usage courant établi par ce qu'il est convenu d'appeler la « Catalunyan School of Compositional Data Analysis ».

**②.A.1** Le champ de la *CoDA* étant en pleine et rapide évolution, nous n'entendons fournir ici que les références de base pour permettre au lecteur de s'informer de l'état actuel du sujet. Si le traitement mathématique de la géométrie de Aitchison est transparent, il est aussi rigoureux, nécessitant une introduction formelle. Heureusement, à part le traité fondamental de Aitchison<sup>630</sup>, difficile à trouver mais d'un abord très pédagogique, la plupart des documents élaborés par le groupe de Girona sont accessibles en ligne sur le web à l'heure où nous écrivons.

**②.A.1.1** Juste à temps pour être cité comme nouvelle référence de base, mais trop tard pour avoir pu servir durant l'élaboration de la présente étude, vient de paraître l'ouvrage collectif *Compositional Data Analysis*<sup>631</sup> qui regroupe les versions remaniées les plus récentes de textes fondamentaux traitant de la *CoDA*.

**②.A.1.2** Pour les praticiens, la formation se fera sans doute aussi moyennant les logiciels, notamment le *package compositions* de van den Boogaart et Tolosana-Delgado<sup>632</sup>, dont le volumineux manuel constitue un ouvrage introductif à lui tout seul. Pour le résumé le plus serré voir l'ouvrage publié en

2008<sup>633</sup>. Une approche complémentaire indispensable en cas de données anormalement distribuées est présentée par Filzmoser et Hron<sup>634</sup> avec leur package **robCompositions**, également pour  $\mathbb{R}$ .

**②.B** L'idée de base de Aitchison est que l'essentiel, en *CoDA*, ce sont les magnitudes et variations relatives, donc le passage d'une échelle absolue à une échelle relative, correspondant à la transformation d'une géométrie euclidienne en une *géométrie simplicielle*. Le vecteur compositionnel, la composition de  $D$  parts, est donc un vecteur positif réel à  $D$  composantes décrivant la relation entre ses parts. La mesure de base d'une composante par rapport à une autre est représentée par le *logratio*, défini<sup>635</sup> comme

**②.B.1** *logratio* additif (*alr*, *additive logratio*)

$$alr(x) = [\log(x_1/x_D), \log(x_2/x_D), \dots, \log(x_{D-1}/x_D)]$$

ou

**②.B.2** *logratio* centré (*clr*, *centered logratio*)

$$clr(x) = [\log(x_1/g(x)), \log(x_2/g(x)), \dots, \log(x_D/g(x))]$$

$g(x)$  dénotant la *moyenne géométrique* des composantes de  $x$  et  $D$  le nombre de composantes de  $x$ .

**②.B.3** Aux précédentes vient s'ajouter la transformation isométrique *ilr*, *isometric logratio*<sup>636</sup> qui a la particularité d'associer les distances et angles du simplexe de Aitchison à leurs correspondants en espace réel. N'ayant pas servi dans le cadre des résultats publiés ici, cette méthode prometteuse, mais se prêtant encore difficilement à nos besoins de modélisation, ne sera pas davantage abordée ici.

**②.B.3.1** Une excellente comparaison des différences entre résultats obtenus par traitement *logratios* et par analyse des pourcentages bruts est fournie par Kucera et Malmgren<sup>637</sup>.

**②.B.4** Les compositions transformées en *logratios* sont représentées par des vecteurs en espace numérique  $\mathbb{R}_+$ . Les variables transformées en *logratios* sont donc des variables *réelles*. Pour leurs particularités, consulter Pawlowsky-Glahn/Egozcue<sup>638</sup>.

628 Pawlowsky-Glahn/Buc-  
cianti 2011 ; Pawlowsky-  
Glahn/Olea 2004 ;  
Pawlowsky-Glahn/Egozcue  
2006 ; Egozcue 2006.

629 van den Boogaart/Tolo-  
sana-Delgado 2008 ; To-  
losana-Delgado/van den  
Boogaart 2011 ; van den  
Boogaart/Tolosana-Del-  
gado/Bren 2011.

630 Aitchison 1986/2003.

631 Pawlowsky-Glahn/Buc-  
cianti 2011.

632 van den Boogaart/Tolo-  
sana-Delgado 2008 ; van  
den Boogaart/Tolosana-  
Delgado/Bren 2011.

633 Tolosana-Delgado 2008.

634 Filzmoser/Hron 2011.

635 Aitchison 1986/2003 ; Ait-  
chison 1999.

636 Egozcue et al. 2003.

637 Kucera/Malmgren 1998.

638 Pawlowsky-Glahn/Egozcue  
2006.

②.B.4.1 Tenant compte de certaines restrictions liées aux particularités de la géométrie simplicielle<sup>639</sup>, les *logratios* se prêtent au traitement statistique conventionnel des variables indépendantes non-contraintes<sup>640</sup>.

②.B.5 En effectuant l'analyse des données compositionnelles en espace simpliciel, les résultats transformés sont équivalents à ceux obtenus utilisant les coordonnées de Aitchison sur un espace euclidien<sup>641</sup>. La seule exception de marque réside en l'analyse des composantes principales (☞ *PCA*, ☞ *principal components analysis*). La *PCA* sur données *logratio* transformées en espace simpliciel doit nécessairement s'effectuer dans un cadre adapté, étant donné que l'espace numérique simpliciel est défini de 0 à 1, alors que normalement les composantes principales peuvent prendre des valeurs négatives.

②.B.6 L'avantage essentiel des *logratios* en espace simpliciel consiste en la cohérence des subcompositions<sup>642</sup>. Les relations entre une composition en  $D$  parts et ses subcompositions  $d_1, d_2, \dots, d_n$ , où  $D \geq d_n$ , restent équivalentes par rapport à  $D$ , ce qui n'est guère le cas si l'on s'en remet aux pourcentages (conservation du *ratio*). L'avantage est évident lorsque l'on considère les représentations triangulaires de systèmes ternaires appréciés des géochimistes. Le rapport interne d'une subcomposition ternaire extraite d'un ensemble de  $d$  composantes reste identique à celui d'une même composition qui serait extraite d'un ensemble de  $d + y$  composantes.

②.B.6.1 Deux autres qualités essentielles des vecteurs compositionnels, et par extension, des rapports exprimés en *logratios*: l'invariance d'échelle et l'invariance à l'égard de la permutation des éléments compositionnels<sup>643</sup>.

②.B.6.2 Le recentrage des variables par la procédure *clr* a pour effet une décompression des données qui compense sensiblement les tassements artificiels induits par les pourcentages. Les modes excentriques se trouvent ré-équilibrés, sans que les valeurs extrêmes ne soient estompées. Les effets d'agrégation sont accentués, au détriment des distances «absolues» (pour autant que l'on s'obs-

tine à considérer les rapports entre pourcentages comme tels).

②.B.6.3 Certains auteurs estiment suffisant l'usage des *logratios* dans le cadre de la statistique multivariée conventionnelle, sans s'encombrer de géométrie simplicielle<sup>644</sup>. Sur le plan théorique, l'incohérence d'une telle approche a été abondamment démontrée<sup>645</sup>. Sur le plan pratique, nous avons dû nous rendre à l'évidence en expérimentant les différentes approches: l'incohérence théorique conduit à des incohérences statistiques très concrètes.

## Dispositif de l'analyse statistique des données CoDA

③.A Nous avons utilisé principalement le package ☞ **compositions**<sup>646</sup> dans le cadre de l'environnement statistique **R**.

③.A.1 Les données de base ont été importées dans **compositions** et transformées/clôturées dans le module ☞ **acomp**.

③.A.1.1 *Below Detection Limit / Structural Zero*: Un des problèmes en analyse chimique est la présence d'échantillons dont les valeurs sur certaines variables sont soit zéro (pour des raisons structurelles ou accidentelles), soit en dessous du seuil de détection<sup>647</sup>. La conséquence de telles valeurs serait normalement l'élimination des points de données, entraînant la diminution correspondante de l'échantillon. **Compositions** propose des algorithmes adaptés afin que l'information structurelle des valeurs sous le seuil de la détection (☞ *Below Detection Limit*, ☞ *BDL*) soit prise en compte comme élément marginal stochastique. Le traitement subséquent les encadre, soit en les explicitant, soit en les excluant du calcul tout en les visualisant.

③.A.2 De même, les transformations *centered logratios* (*clr*) ont été effectuées dans le package ☞ **compositions**.

③.A.3 L'analyse multivariée exploratoire (*multivariate* ☞ *EDA*) en **R** sur données transformées a servi à corriger et à préciser les axes d'analyse utiles dans le cadre de **compositions**.

639 Aitchison 1986/2003.

640 Pawlowsky-Glahn/Egozcue 2006.

641 Pawlowsky-Glahn/Egozcue 2006.

642 Egozcue 2009; Aitchison/Barceló-Vidal/Pawlowsky-Glahn 2002.

643 Egozcue 2009.

644 Baxter/Freestone 2006; Baxter/Beardah/Freestone 2005.

645 Aitchison 2008; Aitchison/Barceló-Vidal/Pawlowsky-Glahn 2002.

646 van den Boogaart/Tolosana-Delgado/Bren 2011.

647 Martín-Fernández/Palarea-Albaladejo/Olea 2011.

Notamment, l'ordre des variables représentées dans les graphiques multivariés correspond à une matrice de *covariance* décroissante.

③.A.4 Les analyses statistiques de base (☞ *PCA*, ☞ *biplot*,<sup>648</sup>, ☞ *analyses factorielles*, ☞ *clusters* hiérarchiques) ont été effectuées dans le cadre de **compositions**. Les coordonnées résultantes nécessitant des traitements ultérieurs ont été exportées vers des logiciels d'analyse et de visualisation plus conventionnels (*SAS JMP*; **Aabel**).

③.A.4.1 Au cours d'un si long travail, il est inévitable que les données traversent plusieurs générations de logiciels. Nous n'en indiquerons ici que les versions finales effectivement utilisées avant la publication :

- **R** 2.14.2;
  - **compositions** 1.10-2;
  - **MASS** 7.3-17;
  - **ggplot2** 0.90;
  - **JMP** 9.0.3
  - **Aabel** 3.06;
- dans un environnement numérique 64 bits sous OS X 10.6.8.

③.A.4.2 Dans certains cas, un nouvel outil multi-plateforme dédié a été utilisé pour le calcul des *PCA* en espace compositionnel et la visualisation des *biplots* multi-dimensionnels: **CoDaPack 2.01**<sup>649</sup>.

③.A.4.3 Les algorithmes concernant la géométrie compositionnelle, les clôtures et le calcul des *centered logratios* sont équivalents dans **CoDaPack 2** et dans **compositions**. Les résultats numériques ont été identiques.

## Analyses post-transformation<sup>650</sup>

④.A Itération de *clusters* ☞ *k-means*; identification des groupes d'agrégation non-catégoriels par rapport aux axes principaux issus de l'analyse *PCA*. À la différence des algorithmes de partition hiérarchiques, les *k-means clusters* tendent à identifier les groupes autour de leur barycentre euclidien par itérations successives. La nécessité d'itération de la procédure avec un nombre variable *k* de *clusters* sert de manière

heuristique à déterminer le nombre de partitions utiles.

④.A.1 Pour l'identification des *k-means clusters*, une variante ☞ *Bayésienne* de l'algorithme ☞ *EM* (☞ *Expectation Maximization*) a été utilisée, en vertu de sa capacité d'inférence de ☞ *maximum likelihood* a posteriori.

④.A.1.1 Dans les cas où les tailles des échantillons ou des *clusters* résultants auraient été à la limite de la fiabilité, des ☞ *simulations* ☞ *Monte Carlo* ont été effectués pour les valider. Ce traitement a été étendu à l'ensemble de l'étude : les résultats d'algorithmes de *clustering* présentés ici sont soutenus par des *simulations Monte Carlo*.

④.B Analyse discriminatoire (☞ *DA*, ☞ *discriminant analysis*): analyse de variance des groupes catégoriels (groupes *a-priori*) par rapport aux axes principaux de covariance issus de l'analyse *PCA*<sup>651</sup>. Elle sert notamment à comparer et à valider la pertinence des groupes catégoriels observables (formes, couleurs) par rapport aux variables continues mesurables (compositions chimiques).

④.C Analyse des correspondances entre *DA* ↔ *k-means* (☞ *CA*, ☞ *correspondence analysis*). Cette analyse catégorielle sert à détecter et à évaluer les correspondances entre les groupes *a priori* validés par la *DA* et les *k-means clusters* définis à partir des variables mesurées, sans information extrinsèque.

④.C.1 Une bonne correspondance catégorielle signifie une bonne équivalence entre les groupes résultant des mesures et ceux basés sur des qualités observables extrinsèques.

④.C.2 Une moindre mesure de correspondance indique que la structure des variables mesurées n'est pas congruente à la structure descriptive *a priori*.

④.C.3 Pour la signification particulière de la *CA* en *CoDA*, notamment le constat essentiel que l'analyse des *logratios* constitue un cas limite de l'analyse des correspondances, voir les travaux fondamentaux de Greenacre<sup>652</sup>.

648 Aitchison/Greenacre 2002.

649 Comas-Cufi/Thió-Henestrosa 2011.

650 Voir van den Boogaart/Tolosana-Delgado 2008.

651 Filzmoser/Hron/Templ 2009.

652 Greenacre 2011 ;  
Greenacre 2010 ;  
Greenacre/Lewi 2009.



④.D L'outil essentiel d'analyse en sens inverse, d'une variable continue par rapport à des variables catégorielles, est la *régression logistique* (☞ *logistic regression*). Elle est exemplifiée ici d'abord par l'analyse des différences de concentration des éléments chimiques par rapport aux couleurs et aux formes.

④.D.1 La *régression logistique* présente l'avantage technique de ne pas présupposer une distribution gaussienne, des variances égales, ni de relation linéaire entre les prédicteurs. Elle présente l'avantage conceptuel d'associer à chaque groupe catégoriel un espace de probabilités permettant une lecture quasi-nomographique des diagrammes : à toute concentration donnée d'une composante chimique correspond un spectre de probabilités d'appartenance aux différents groupes catégoriels.

④.D.1.1 À noter que la distribution des points appartenant aux groupes catégoriels dans les diagrammes de *régression logistique* est effectuée selon un algorithme de distribution stochastique (☞ *jitter*) censé simuler la densité des membres de chaque groupe. Les coordonnées individuelles des points illustrés ne sont pas interprétables au sens de repères absolus.

## Mise en garde

⑤.A Historiquement, *CoDA* est encore jeune. Aitchison et quelques acolytes de sa génération mis à part, c'est la toute première génération de statisticiens qui s'y applique.

⑤.B Les auteurs de la présente étude en sont eux-mêmes encore à essayer les plâtres en matière de *CoDA*.

⑤.C La percée d'un progrès fondamental en méthodologie quantitative auprès du public averti est, à notre époque, trop souvent due à son accessibilité informatique, et moins le fait de son mérite intellectuel. La pratique de *CoDA* deviendra plus répandue au fur et à mesure que le *mainstream* des logiciels statistiques en facilitera l'accès.

⑤.D Il s'en suit de 5.A, B et C que nous n'avons que très modérément effleuré le potentiel de *CoDA*. La nécessité de lisibilité méthodologique face à un public habitué aux méthodes traditionnelles l'a généralement emporté sur la pure cohérence théorique. De nouvelles analyses ne manqueront pas de tracer une large voie, là où nous n'avons su faire que quelques pas.

## Annex 2

### Chemische Analysen (Haupt- und NebenkompONENTEN sowie Spurenelemente)

Yvonne Gerber und Willem B. Stern

Proben-Nr. Geochem. Lab.	Inv.-Nr. ADB	pièce	Kategorie	Farbe	SiO <sub>2</sub> wt.-%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	MnO wt.-%	MgO wt.-%	CaO wt.-%
XV-9677P 096 whlg	75585		Becher	B	64.57	2.30	0.93	0.24	1.99	21.72
XV-10362	78261	8	Flasche	B	63.50	1.93	0.53	0.38	2.08	23.66
XV-10369	78261	7	Flasche	B	64.19	1.97	0.53	0.37	2.03	23.29
XV-9596P 65 whlg	75530	36	Flasche	B	63.43	1.87	0.67	0.57	2.28	23.01
XV-9597P 66 whlg	75458		Flasche	B	65.25	1.93	0.80	0.89	1.88	20.30
XV-10361	78296	11	Fläschchen	B	64.11	2.22	0.77	0.17	2.00	22.43
XV-10368	78163	15	Fläschchen	B	64.22	2.24	0.80	<	1.95	22.40
XV-10417	78174	24	Fläschchen	B	64.24	2.38	0.84	0.13	1.82	23.12
XV-10322	78170	3	Becher	F	71.59	0.40	0.10	0.24	1.06	12.49
XV-10323	78151	158	Becher	F	71.49	0.40	0.11	0.24	1.02	12.47
XV-10404	78192	31	Becher	F	69.95	0.63	0.22	0.43	1.75	13.03
XV-10387	78151	189	Flasche	F	65.16	0.93	0.18	0.50	2.34	18.53
XV-9598P 67 whlg	75426		Flasche	F	64.98	0.88	0.28	0.58	2.22	19.27
XV-10371	78259	9	Fläschchen	F	65.75	0.98	0.15	0.50	2.31	18.15
XV-10374	78252	101	Kelchglas mit Balusterschaft	F	68.80	1.11	0.25	0.46	1.49	14.95
XV-10379	78252	51	Kelchglas mit Balusterschaft	F	71.65	0.34	0.11	0.33	1.26	11.14
XV-10380	78151	174	Kelchglas mit Balusterschaft	F	69.40	0.70	0.20	0.57	1.39	14.26
XV-10392	78151	172	Kelchglas mit Balusterschaft	F	64.43	1.93	0.57	0.20	2.05	23.07
XV-10394	78239	15	Kelchglas mit Balusterschaft	F	70.62	1.04	0.24	0.50	1.55	15.38
XV-10413	78151	192	Kelchglas mit Balusterschaft	F	68.42	0.93	0.25	0.72	1.19	14.81
XV-10420	78239	69	Kelchglas mit Balusterschaft	F	72.40	0.60	0.15	0.81	0.75	6.70
XV-10421	78239	59	Kelchglas mit Balusterschaft	F	71.26	0.67	0.17	0.43	1.18	11.24
XV-10426	78252	48	Kelchglas mit Balusterschaft	F	69.41	0.50	0.12	0.34	1.42	13.83
XV-9659P 089 whlg	n.n.		Kelchglas mit Balusterschaft	F	72.99	0.35	0.15	0.26	0.97	11.79
XV-9663P 071 whlg	77091		Kelchglas mit Balusterschaft	F	71.43	0.76	0.26	0.33	1.18	8.73
XV-9666P 074 whlg	77019		Kelchglas mit Balusterschaft	F	69.72	0.43	0.23	0.34	1.42	12.89
XV-9669P 077 wwhlg	75426		Kelchglas mit Balusterschaft	F	65.05	0.88	0.28	0.59	2.21	19.30
XV-9670P 078 wwhlg	75522		Kelchglas mit Balusterschaft	F	69.94	1.14	0.23	0.42	1.52	13.98
XV-9671P 079 wwhlg	75522		Kelchglas mit Balusterschaft	F	69.89	0.85	0.23	0.46	1.48	13.71
XV-9678P 101 whlg	75214		Deckel	Fi	68.64	0.46	0.20	0.31	1.71	15.32
XV-10377	78151	3	Flasche	Fi	69.15	0.96	0.21	0.50	1.70	13.90
XV-9711P 13 whlg	n.n.		Glas unbestimmt	Fi	69.41	0.95	0.23	0.49	1.68	13.45
XV-10364	78151	4	Kelchglas mit Balusterschaft	Fi	62.19	1.90	0.77	0.30	2.34	24.13
XV-10365	78151	9	Kelchglas mit Balusterschaft	Fi	66.92	0.59	0.20	0.43	1.71	14.97
XV-10423	78239	50	Kelchglas mit Balusterschaft	Fi	68.51	0.88	0.23	0.46	1.55	14.71
XV-10424	78239	65	Kelchglas mit Balusterschaft	Fi	69.14	0.74	0.17	0.40	1.60	13.68
XV-9667P 075 wwhlg	75238		Kelchglas mit Balusterschaft	Fi	69.02	0.63	0.24	0.44	1.58	13.63
XV-9679P 102 whlg	75547		Kelchglas mit Balusterschaft	Fi	68.71	0.82	0.23	0.63	1.59	12.74
XV-9676P 094 whlg	77575	56	Becher	M	60.04	0.73	0.24	0.46	0.88	16.78
XV-10425	78251	38	Flasche	M	60.23	1.51	0.17	0.51	1.71	13.62
XV-10432	75489	21	Flasche	M	62.88	0.81	0.18	0.38	1.20	15.96
XV-9712P 11 whlg	75437	11	Glas unbestimmt	M	63.39	0.78	0.25	0.41	1.30	16.93
XV-10381	78239	61	Becher	G	63.21	2.36	0.74	0.14	2.25	22.94
XV-10382	78252	10	Becher	G	65.24	0.93	0.31	0.74	1.92	22.38
XV-10383	78174	62	Becher	G	65.68	2.03	0.71	0.20	1.78	22.67
XV-10403	78239	36	Becher	G	62.33	2.42	0.80	0.16	2.34	23.91
XV-10433	78174	69	Becher	G	66.00	2.03	0.77	0.17	1.85	22.38
XV-9673P 091 whlg	77501		Becher	G	62.03	2.54	0.90	0.16	2.29	23.25
XV-9674P 092 whlg	77501		Becher	G	63.75	1.37	0.42	0.51	2.08	20.23
XV-9675P 093 whlg	77091		Becher	G	65.45	1.78	0.69	0.31	1.85	21.78
XV-9721P 95 whlg	77527		Becher	G	65.12	1.91	0.72	0.22	1.90	23.08

Die folgende Tabelle finden Sie als Excel-Datei  
auf <http://www.erz.be.ch/erz/de/index/kultur/archaeologie/daten.html>

Na <sub>2</sub> O wt.-%	K <sub>2</sub> O wt.-%	TiO <sub>2</sub> wt.-%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wt.-%	Ba ppm	Co ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sn ppm	Sr ppm	Zn ppm	Zr ppm	Proben-Nr. Geochem. Lab.
0.29	5.63	0.35	1.55	170	443	143	606	139	72	30	178	222	242	XV-9677P 096 whlg
0.34	5.22	0.23	1.52	720	105	82	348	158	432	27	178	249	183	XV-10362
0.17	5.19	0.22	1.52	780	137	74	222	154	762	75	166	233	153	XV-10369
0.24	5.72	0.26	1.41	935	305	121	300	137	84	57	309	215	135	XV-9596P 65 whlg
0.32	6.72	0.16	1.25	535	395	118	728	152	144	9	216	213	137	XV-9597P 66 whlg
0.51	5.31	0.21	1.57	465	575	167	1921	139	492	21	268	303	161	XV-10361
0.34	5.32	0.21	1.62	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	XV-10368
0.46	4.60	0.20	1.57	495	407	128	1859	99	474	30	307	261	159	XV-10417
0.38	12.72	0.12	0.38	335	24	63	61	238	1470	60	94	97	169	XV-10322
0.44	12.78	0.12	0.37	325	36	67	61	237	1458	66	99	79	166	XV-10323
0.47	11.62	0.20	0.99	900	57	66	25	255	1452	15	274	231	251	XV-10404
0.19	10.21	0.17	0.95	870	44	67	110	230	1134	63	215	130	187	XV-10387
0.45	9.98	0.11	0.82	230	29	73	22	209	138	42	100	112	125	XV-9598P 67 whlg
0.31	9.96	0.16	0.94	790	38	66	121	215	1164	42	187	125	146	XV-10371
0.44	11.23	0.18	0.49	785	45	53	58	194	1290	24	117	96	190	XV-10374
0.46	13.49	0.10	0.38	475	27	12	40	246	8496	12	70	90	174	XV-10379
0.42	11.55	0.17	0.64	1000	59	10	57	220	7716	-5	194	99	150	XV-10380
0.28	5.11	0.20	1.80	540	51	64	45	137	576	36	188	214	149	XV-10392
0.34	9.23	0.17	0.48	405	54	61	102	233	924	48	71	98	203	XV-10394
0.34	11.57	0.17	0.66	1045	83	61	193	170	1536	78	156	133	135	XV-10413
1.15	16.38	0.13	0.26	855	35	64	88	484	1860	51	129	98	174	XV-10420
0.48	13.41	0.12	0.39	720	35	61	104	232	1572	72	65	87	176	XV-10421
0.41	12.62	0.11	0.48	620	20	72	154	260	1632	60	93	114	137	XV-10426
0.31	12.34	0.11	0.45	130	89	59	52	210	228	36	114	-40	170	XV-9659P 089 whlg
0.47	15.94	0.10	0.63	275	60	56	24	237	234	24	190	-40	101	XV-9663P 071 whlg
0.30	13.82	0.10	0.51	310	24	47	28	216	216	18	90	-40	156	XV-9666P 074 whlg
0.46	9.90	0.11	0.81	245	33	69	25	184	228	27	98	116	119	XV-9669P 077 wwhlg
0.24	11.40	0.16	0.71	275	54	44	34	173	300	39	185	-40	183	XV-9670P 078 wwhlg
0.32	12.00	0.13	0.64	265	32	63	469	190	258	12	151	-40	135	XV-9671P 079 wwhlg
0.33	10.86	0.10	0.56	215	48	64	2152	239	1866	63	128	93	158	XV-9678P 101 whlg
0.38	11.34	0.17	0.67	900	2	80	874	219	2118	63	220	116	159	XV-10377
0.35	12.20	0.15	0.73	245	41	73	306	193	390	42	191	93	135	XV-9711P 13 whlg
0.48	5.31	0.21	1.77	720	44	71	84	119	738	54	201	179	154	XV-10364
0.44	12.66	0.14	0.67	685	44	63	1664	239	2748	42	163	119	151	XV-10365
0.33	11.15	0.14	0.50	690	72	70	2971	217	3972	36	97	124	176	XV-10423
0.31	12.34	0.15	0.69	645	27	66	1124	211	1710	60	181	124	157	XV-10424
0.24	12.81	0.13	0.71	235	59	67	497	208	498	48	168	92	151	XV-9667P 075 wwhlg
0.29	13.13	0.10	0.78	490	60	62	1627	228	978	30	214	118	98	XV-9679P 102 whlg
0.46	12.37	0.09	7.64	205	32	62	40	204	276	33	110	90	114	XV-9676P 094 whlg
0.53	13.77	0.04	6.95	1460	44	72	19	239	1782	54	360	142	61	XV-10425
0.48	11.47	0.11	5.73	530	24	44	97	205	1302	45	71	104	142	XV-10432
0.36	11.47	0.10	4.62	290	14	43	34	197	246	57	99	91	143	XV-9712P 11 whlg
0.29	5.92	0.24	1.50	355	21	80	88	149	606	51	154	136	187	XV-10381
0.31	5.92	0.43	1.15	1055	32	11	38	145	5028	-5	196	146	217	XV-10382
0.31	4.42	0.18	1.55	400	45	16	47	120	4296	30	170	225	148	XV-10383
0.27	5.37	0.25	1.60	540	32	74	38	171	786	84	234	129	208	XV-10403
0.51	4.04	0.31	1.42	740	12	58	161	53	462	57	779	240	266	XV-10433
0.27	5.98	0.36	1.98	145	15	50	36	132	36	18	241	193	250	XV-9673P 091 whlg
0.28	9.70	0.18	1.22	350	29	65	37	164	162	48	247	142	136	XV-9674P 092 whlg
0.32	5.95	0.23	1.44	305	15	60	55	126	60	36	235	194	173	XV-9675P 093 whlg
0.23	4.59	0.15	1.87	230	36	65	13	95	132	21	257	279	153	XV-9721P 95 whlg

Proben-Nr. Geochem. Lab.	Inv.-Nr. ADB	pièce	Kategorie	Farbe	SiO <sub>2</sub> wt.-%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	MnO wt.-%	MgO wt.-%	CaO wt.-%
XV-10363	78271	3	Flasche	G	66.48	0.97	0.19	0.49	1.84	15.49
XV-10367	81930	14	Flasche	G	62.32	2.12	0.87	0.13	2.38	23.72
XV-10385	78271	5	Flasche	G	61.66	2.19	0.81	0.21	2.13	24.32
XV-10435	78287	56	Flasche	G	62.68	1.99	0.67	0.15	2.18	25.55
XV-9599P 68 whlg	75214		Flasche	G	63.50	2.43	0.74	0.20	2.27	21.58
XV-9600P 69 whlg	75214		Flasche	G	64.19	1.73	0.70	0.26	1.91	24.35
XV-9614P 61 whlg	75529	25	Flasche	G	64.76	2.05	0.75	0.36	1.91	23.32
XV-9615P 62 whlg	75529	25	Flasche	G	65.44	1.78	0.67	0.22	1.88	22.61
XV-9616P 63 whlg	77089	52	Flasche	G	63.15	2.18	0.86	0.29	1.94	23.75
XV-9617P 64 whlg	77089	52	Flasche	G	63.91	2.37	0.93	0.15	2.14	22.34
XV-10397	78258		Fläschchen	G	63.07	1.81	0.60	0.43	1.90	24.48
XV-10416	78171	3	Fläschchen	G	63.58	2.39	0.81	0.28	2.04	23.19
XV-10418	78233	12	Fläschchen	G	62.83	2.05	0.69	0.12	2.32	24.11
XV-10431	78278	72	Fläschchen	G	67.28	1.16	0.47	0.09	2.01	21.52
XV-10434	78278	87	Fläschchen	G	62.82	2.32	0.98	0.60	1.91	22.34
XV-9592P 51 whlg	77501		Fläschchen	G	62.42	1.84	0.65	0.48	2.18	23.35
XV-9593P 52 whlg	77501		Fläschchen	G	63.32	2.54	1.00	0.17	2.15	22.28
XV-9594P 54 whlg	77575		Fläschchen	G	64.68	1.78	0.72	0.18	1.85	22.52
XV-9618P 56 whlg	77091		Fläschchen	G	65.23	1.99	1.40	0.36	1.90	22.15
XV-9619P 57 whlg	77089	52	Fläschchen	G	64.61	2.10	0.68	0.11	1.67	23.66
XV-9620P 59 whlg	75471		Fläschchen	G	65.66	2.03	0.69	0.27	1.96	21.85
XV-9716P 53 whlg	77519		Fläschchen	G	63.05	2.15	0.84	0.14	2.05	23.78
XV-9717P 55 whlg	77504		Fläschchen	G	62.79	2.63	1.06	0.18	1.80	23.81
XV-9719P 60 whlg	75471		Fläschchen	G	65.62	2.09	0.64	0.15	2.07	21.86
XV-9664P 072 whlg	78250	1	Kelchglas mit Balusterschaft	G	64.59	2.98	1.00	0.19	2.00	21.69
XV-9665P 073 whlg	78250	2	Kelchglas mit Balusterschaft	G	62.96	2.92	1.10	0.16	1.97	23.43
XV-9668P 076 wwhlg	75458		Kelchglas mit Balusterschaft	G	65.48	2.18	0.75	0.27	1.89	23.05
XV-9672P 080 wwhlg	77024		Kelchglas mit Balusterschaft	G	62.58	2.60	0.97	0.39	2.22	23.18
XV-10389	78252	53	Kelchglas mit gestochenem Fuss	G	64.49	2.18	0.77	0.21	1.48	22.08
XV-10427	78252	72	Kelchglas mit gestochenem Fuss	G	64.41	2.12	0.81	0.26	1.99	22.25
XV-9652P 081 whlg	77091		Kelchglas mit gestochenem Fuss	G	66.02	1.86	0.71	0.20	2.02	21.82
XV-9653P 082 whlg	77575		Kelchglas mit gestochenem Fuss	G	64.05	2.01	0.85	0.34	1.92	23.06
XV-9654P 084 whlg	75426		Kelchglas mit gestochenem Fuss	G	64.35	2.01	0.79	0.16	2.11	23.18
XV-9655P 086 whlg	75234		Kelchglas mit gestochenem Fuss	G	64.29	2.06	0.78	0.14	1.90	23.20
XV-9656P 085 whlg	77024		Kelchglas mit gestochenem Fuss	G	65.17	2.00	0.66	0.26	1.92	24.09
XV-9657P 087 whlg	75461		Kelchglas mit gestochenem Fuss	G	64.25	1.74	0.62	0.15	1.84	24.41
XV-9658P 088 whlg	77590		Kelchglas mit gestochenem Fuss	G	64.33	2.28	0.88	0.17	1.82	23.53
XV-9720P 83 whlg	77527		Kelchglas mit gestochenem Fuss	G	63.32	1.99	0.66	0.33	2.39	23.99
XV-9591P 31	77089	58	Butzenscheibe	G	63.85	2.13	0.73	0.16	2.02	23.37
XV-9601P 21 whlg	75403	3	Butzenscheibe	G	65.47	1.64	0.64	0.12	1.97	22.88
XV-9602P 23 whlg	75524	27	Butzenscheibe	G	64.64	1.99	0.74	0.25	1.99	22.97
XV-9603P 24 whlg	77501		Butzenscheibe	G	63.66	2.23	0.83	0.18	2.05	23.45
XV-9604P 25 whlg	75470		Butzenscheibe	G	64.48	1.91	0.66	0.19	1.80	23.85
XV-9605P 26 whlg	75470		Butzenscheibe	G	64.68	2.30	0.83	0.14	1.85	22.55
XV-9606P 29 whlg	75429		Butzenscheibe	G	65.49	1.87	0.62	0.17	1.91	23.27
XV-9607P 30 whlg	77030		Butzenscheibe	G	63.61	2.24	0.77	0.25	2.15	23.13
XV-9608P 32 whlg	77070	13	Butzenscheibe	G	63.33	2.40	1.03	0.16	2.26	22.37
XV-9609P 34 whlg	77575		Butzenscheibe	G	63.73	2.64	0.94	0.23	1.88	22.64
XV-9610P 35 whlg	77575		Butzenscheibe	G	62.53	2.25	1.08	0.14	2.11	24.28
XV-9611P 36 whlg	77030		Butzenscheibe	G	64.56	2.39	0.93	0.16	1.85	23.43
XV-9612P 39 whlg	77045	82	Butzenscheibe	G	64.24	2.20	0.86	0.13	2.03	22.70
XV-9613P 40 whlg	77045	82	Butzenscheibe	G	63.68	2.23	0.87	0.15	1.95	23.23
XV-9709P 27 whlg	75585		Butzenscheibe	G	64.59	2.42	0.93	0.15	1.91	22.93
XV-9710P 28 whlg	75445		Butzenscheibe	G	62.98	2.05	0.81	0.16	1.96	24.02
XV-9713P 33 whlg	77575		Butzenscheibe	G	64.02	2.24	0.89	0.89	1.87	22.49
XV-9714P 37 whlg	77032		Butzenscheibe	G	64.11	2.65	0.82	0.18	2.08	23.37
XV-9715P 38 whlg	77032		Butzenscheibe	G	65.06	2.15	0.73	0.28	2.15	22.09
XV-10366	78174	89	Zylinderglas	G	59.03	4.13	0.81	0.59	3.51	21.62
XV-10370	88123	5	Zylinderglas	G	62.69	2.12	0.74	0.21	2.23	23.79
XV-10372	88125	4	Zylinderglas	G	63.64	2.20	0.67	0.65	1.90	22.98
XV-10375	88123	3	Zylinderglas	G	63.59	2.17	0.75	0.23	2.17	22.91
XV-10388	88123	1	Zylinderglas	G	64.01	2.22	0.77	0.23	1.77	20.13
XV-10390	88125	5	Zylinderglas	G	62.35	1.55	0.37	0.35	2.20	24.05
XV-10393	88123	2	Zylinderglas	G	63.62	2.21	0.76	0.23	2.23	22.80
XV-10396	88123	4	Zylinderglas	G	63.67	2.17	0.80	0.32	1.81	20.12
XV-10398	75541	8	Zylinderglas	G	61.75	3.61	1.02	0.25	1.84	24.06
XV-10405	88125	3	Zylinderglas	G	62.38	1.53	0.31	0.34	2.20	24.21



Na <sub>2</sub> O wt.-%	K <sub>2</sub> O wt.-%	TiO <sub>2</sub> wt.-%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wt.-%	Ba ppm	Co ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sn ppm	Sr ppm	Zn ppm	Zr ppm	Proben-Nr. Geochem. Lab.
0.36	11.46	0.17	0.75	855	83	64	3670	206	5136	33	192	136	156	XV-10363
0.44	5.24	0.60	1.59	435	15	65	132	128	624	27	213	208	278	XV-10367
0.33	5.52	0.35	1.94	600	51	17	38	117	4116	<	328	268	152	XV-10385
0.25	4.13	0.48	1.47	425	50	59	110	102	402	51	231	201	254	XV-10435
0.26	7.20	0.22	1.34	160	51	56	3	149	174	21	159	154	172	XV-9599P 68 whlg
0.22	4.70	0.16	1.51	175	27	70	80	71	108	36	240	180	155	XV-9600P 69 whlg
0.33	4.74	0.17	1.44	300	57	61	25	110	186	36	211	173	155	XV-9614P 61 whlg
0.29	5.05	0.43	1.36	195	14	52	36	97	78	36	243	196	246	XV-9615P 62 whlg
0.41	5.03	0.21	1.79	275	36	58	39	109	144	39	218	262	205	XV-9616P 63 whlg
0.37	5.39	0.29	1.83	220	17	64	24	105	132	42	246	269	213	XV-9617P 64 whlg
0.27	4.33	0.17	2.42	785	45	60	94	122	522	63	225	241	132	XV-10397
0.36	5.07	0.2	1.59	785	29	55	150	125	690	27	250	199	163	XV-10416
0.35	5.17	0.22	1.63	430	38	68	71	112	648	45	200	226	167	XV-10418
0.23	5.14	0.57	1.07	235	45	55	71	168	732	75	113	119	291	XV-10431
0.43	5.60	0.22	2.17	930	38	68	116	100	594	39	336	321	171	XV-10434
0.35	6.83	0.17	1.48	280	29	59	72	141	72	60	249	221	157	XV-9592P 51 whlg
0.32	5.70	0.37	1.90	130	38	70	36	107	192	30	224	190	233	XV-9593P 52 whlg
0.21	5.64	0.51	1.52	200	38	53	53	102	84	45	245	220	293	XV-9594P 54 whlg
0.23	4.85	0.16	1.40	240	65	63	48	163	138	45	228	200	161	XV-9618P 56 whlg
0.19	5.04	0.25	1.47	130	41	55	24	71	54	30	263	172	165	XV-9619P 57 whlg
0.26	5.35	0.17	1.54	305	41	56	30	112	96	33	264	229	145	XV-9620P 59 whlg
0.36	5.23	0.47	1.69	165	59	61	72	122	90	42	193	174	238	XV-9716P 53 whlg
<	4.77	0.57	2.13	285	24	64	33	77	102	15	601	339	264	XV-9717P 55 whlg
0.22	5.62	0.19	1.34	165	26	78	18	125	108	30	186	155	160	XV-9719P 60 whlg
0.21	5.20	0.48	1.40	250	27	60	36	103	102	24	355	271	271	XV-9664P 072 whlg
0.39	4.75	0.37	1.73	220	9	67	37	109	126	15	225	187	245	XV-9665P 073 whlg
<	4.66	0.19	1.36	190	18	55	42	111	66	27	172	137	181	XV-9668P 076 wwhlg
0.27	5.71	0.24	1.62	295	21	68	59	115	102	30	255	200	186	XV-9672P 080 wwhlg
0.81	5.95	0.43	1.16	365	48	68	33	122	486	72	167	220	234	XV-10389
0.32	5.40	0.19	1.77	670	33	64	166	111	546	30	406	298	139	XV-10427
0.29	5.06	0.44	1.37	210	36	49	31	103	96	39	203	229	230	XV-9652P 081 whlg
0.29	4.94	0.50	1.78	285	14	64	58	109	78	36	253	274	252	XV-9653P 082 whlg
0.27	4.54	0.57	1.73	190	20	61	40	110	66	27	215	226	278	XV-9654P 084 whlg
<	5.71	0.19	1.48	175	24	65	33	112	108	9	416	241	155	XV-9655P 086 whlg
<	4.21	0.17	1.36	265	3	40	24	100	6	24	264	191	142	XV-9656P 085 whlg
<	5.05	0.17	1.57	185	3	51	15	110	90	36	173	179	150	XV-9657P 087 whlg
0.39	4.29	0.41	1.65	135	41	69	56	69	54	39	298	253	243	XV-9658P 088 whlg
<	4.97	0.18	2.01	325	11	64	15	120	66	27	177	153	150	XV-9720P 83 whlg
0.28	5.48	0.17	1.57	165	45	78	31	138	96	36	247	227	154	XV-9591P 31
0.25	5.10	0.37	1.38	105	36	57	34	126	144	45	204	175	224	XV-9601P 21 whlg
0.30	5.15	0.17	1.56	280	21	69	60	91	114	42	441	273	136	XV-9602P 23 whlg
0.34	5.29	0.22	1.51	190	36	56	42	135	216	45	212	216	144	XV-9603P 24 whlg
<	5.12	0.20	1.54	185	26	53	43	76	114	15	272	190	185	XV-9604P 25 whlg
0.29	5.09	0.39	1.62	185	33	55	55	109	108	30	203	220	252	XV-9605P 26 whlg
0.22	4.51	0.17	1.54	175	35	52	32	108	78	60	225	239	180	XV-9606P 29 whlg
0.25	5.55	0.18	1.60	220	48	53	44	132	72	33	218	207	143	XV-9607P 30 whlg
0.27	5.96	0.48	1.48	225	42	77	61	150	90	45	196	191	254	XV-9608P 32 whlg
0.24	5.32	0.34	1.70	205	35	71	46	125	138	33	261	238	267	XV-9609P 34 whlg
0.25	4.86	0.41	1.84	165	27	55	34	114	108	42	227	227	255	XV-9610P 35 whlg
<	4.78	0.19	1.51	160	33	74	46	130	132	18	199	233	175	XV-9611P 36 whlg
0.22	5.42	0.53	1.44	135	33	50	23	123	114	33	178	192	242	XV-9612P 39 whlg
0.45	5.17	0.43	1.57	225	63	56	52	102	192	18	224	198	258	XV-9613P 40 whlg
0.32	4.58	0.36	1.58	205	27	65	67	107	120	33	272	282	231	XV-9709P 27 whlg
0.34	5.19	0.56	1.63	115	33	50	60	112	84	12	202	204	247	XV-9710P 28 whlg
0.34	4.86	0.50	1.61	445	48	55	41	91	144	42	284	277	289	XV-9713P 33 whlg
0.29	4.37	0.33	1.59	200	36	62	33	94	78	57	246	217	222	XV-9714P 37 whlg
<	5.65	0.19	1.54	295	29	68	57	170	204	18	183	164	180	XV-9715P 38 whlg
1.53	4.43	0.21	3.20	1965	80	70	262	56	462	15	610	181	200	XV-10366
0.39	5.20	0.35	1.68	440	63	79	238	105	702	81	210	189	152	XV-10370
0.47	5.50	0.18	1.22	1170	65	82	98	119	690	96	176	198	136	XV-10372
0.35	5.37	0.30	1.62	440	32	74	111	120	444	75	206	202	166	XV-10375
0.51	7.76	0.33	1.59	615	21	70	61	132	870	27	268	215	153	XV-10388
0.62	6.60	0.13	1.16	775	50	61	100	155	654	51	201	161	140	XV-10390
0.33	5.46	0.30	1.58	580	26	53	57	122	546	15	203	194	171	XV-10393
0.47	7.74	0.33	1.59	770	20	82	234	113	1344	150	238	231	143	XV-10396
0.67	4.21	0.41	1.72	525	21	59	98	67	582	30	279	214	221	XV-10398
0.62	6.64	0.13	1.20	750	53	61	66	147	756	9	193	168	135	XV-10405

Proben-Nr. Geochem. Lab.	Inv.-Nr. ADB	pièce	Kategorie	Farbe	SiO <sub>2</sub> wt.-%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	MnO wt.-%	MgO wt.-%	CaO wt.-%
XV-10406	88125	2	Zylinderglas	G	62.23	1.55	0.37	0.35	2.20	24.10
XV-10407	88125	1	Zylinderglas	G	62.21	1.55	0.37	0.35	2.23	24.11
XV-10412	78174	93	Zylinderglas	G	64.33	1.49	0.52	0.17	1.80	24.24
XV-10414	78170	2	Zylinderglas	G	63.76	2.62	0.93	0.31	2.39	20.79
XV-10415	78174	92	Zylinderglas	G	65.09	1.67	0.65	0.14	1.91	23.37
XV-10320	78251	111	Pfeifenabschlag	B	62.93	1.58	0.40	<	1.90	20.51
XV-10386	75444	8	Pfeifenabschlag	B	63.07	2.20	0.75	0.37	2.21	21.96
XV-9628P 139 shlg	77501		Pfeifenabschlag	B	64.41	2.32	0.92	0.36	2.16	22.76
XV-9634P 138 whlg	77501		Pfeifenabschlag	B	64.14	1.71	0.58	0.89	2.26	21.84
XV-9730P 143 whlg	77091	5	Pfeifenabschlag	B	64.60	2.64	1.12	0.71	1.84	21.73
XV-9732P 141 whlg	75214		Pfeifenabschlag	B	71.51	0.83	0.22	0.69	1.32	9.77
XV-9733P 140 whlg	78249	2	Pfeifenabschlag	B	61.66	1.44	0.48	0.13	2.26	20.71
XV-10378	78239	130	Pfeifenabschlag	F	70.83	1.12	0.23	0.35	1.40	13.03
XV-10395	78239	130	Pfeifenabschlag	F	66.61	1.03	0.19	0.54	2.06	15.85
XV-10419	78237	5	Pfeifenabschlag	F	70.01	0.79	0.19	0.69	1.56	14.48
XV-10436	78239	130	Pfeifenabschlag	F	69.77	0.78	0.24	0.44	1.66	14.65
XV-9632P 136 whlg	77501		Pfeifenabschlag	F	66.00	0.95	0.38	0.66	1.80	18.75
XV-9633P 137 whlg	77501		Pfeifenabschlag	F	64.45	1.13	0.33	1.10	2.35	18.25
XV-9731P 142 whlg	75214		Pfeifenabschlag	F	64.94	1.99	0.75	0.32	1.84	22.12
XV-10373	78239	130	Pfeifenabschlag	G	63.29	1.97	0.65	0.18	1.95	24.73
XV-10391	78239	130	Pfeifenabschlag	G	70.42	0.89	0.18	0.38	1.72	14.37
XV-10422	78239	130	Pfeifenabschlag	G	63.00	1.66	0.54	0.28	2.11	24.38
XV-9621P 126 whlg	75524	28	Pfeifenabschlag	G	65.15	1.81	0.70	0.31	1.96	22.75
XV-9622P 127 whlg	75523	85	Pfeifenabschlag	G	62.97	2.03	0.80	0.35	2.06	24.07
XV-9623P 128 whlg	75523	85	Pfeifenabschlag	G	61.83	2.78	1.08	0.20	2.10	24.87
XV-9624P 129 whlg	75523	85	Pfeifenabschlag	G	63.63	2.00	0.67	0.10	2.19	23.55
XV-9625P 130 whlg	77501		Pfeifenabschlag	G	63.95	2.53	0.94	0.28	2.18	22.77
XV-9626P 132 whlg	77091		Pfeifenabschlag	G	63.44	2.04	0.73	0.73	2.14	22.04
XV-9627P 131 whlg	77091		Pfeifenabschlag	G	66.47	3.24	1.27	0.13	2.06	20.16
XV-9629P 133 whlg	77077	15	Pfeifenabschlag	G	64.52	2.34	0.94	0.11	1.94	22.00
XV-9630P 134 whlg	77575		Pfeifenabschlag	G	64.48	1.76	0.75	0.08	2.37	23.32
XV-9631P 135 whlg	77575		Pfeifenabschlag	G	64.93	2.18	0.84	0.15	1.91	22.43
XV-10384	78174	78	Glastropfen	B	64.66	1.88	0.61	0.43	1.93	23.11
XV-10428	78251	111	Glastropfen	B	63.08	1.73	0.47	0.87	1.90	20.87
XV-9645P 156 whlg	77094	16	Glastropfen	B	64.50	1.92	0.79	0.37	1.92	22.05
XV-9646P 157 whlg	75214	2	Glastropfen	B	63.49	1.87	0.88	0.17	2.04	23.82
XV-9647P 158 whlg	75214	2	Glastropfen	B	65.39	1.66	0.57	0.47	1.97	21.95
XV-9649P 160 whlg	75246	31	Glastropfen	Br	65.00	1.32	0.49	2.23	1.91	22.55
XV-10359	77551	3	Glastropfen	F	71.97	0.58	0.26	0.37	1.59	13.35
XV-10376	78174	32	Glastropfen	F	70.37	0.56	0.15	0.36	1.53	12.75
XV-10401	75437	42	Glastropfen	F	63.66	0.91	0.29	0.81	2.20	20.55
XV-10408	78237	5	Glastropfen	F	69.52	0.67	0.23	0.46	1.57	13.53
XV-9648P 159 whlg	75214	2	Glastropfen	F	70.74	0.48	0.31	0.51	1.38	13.20
XV-9650P 161 whlg	75246	31	Glastropfen	F	69.25	0.69	0.20	0.54	1.62	13.48
XV-9651P 162 whlg	75424	1	Glastropfen	F	69.49	0.84	0.27	0.59	1.68	14.57
XV-10360	75447	34	Glastropfen	G	62.60	1.78	0.62	0.17	2.13	25.08
XV-10400	75447	34	Glastropfen	G	63.83	1.67	0.63	0.07	1.77	25.00
XV-9635P 146 whlg	75524	28	Glastropfen	G	63.83	1.94	0.76	0.64	2.05	23.52
XV-9636P 147 Auwhlg	75524	28	Glastropfen	G	65.09	1.61	0.64	0.13	1.96	23.35
XV-9637P 148 Auwhlg	75246	31	Glastropfen	G	63.41	2.48	1.02	0.16	2.19	22.66
XV-9638P 149 Auwhlg	75246	31	Glastropfen	G	61.87	2.49	0.81	0.15	2.02	24.38
XV-9639P 150 Auwhlg	77084	22	Glastropfen	G	64.87	1.55	0.57	0.21	1.94	23.22
XV-9640P 151	77084	22	Glastropfen	G	64.90	2.27	0.91	0.41	2.05	22.79
XV-9641P 152 Auwhlg	77060	6	Glastropfen	G	63.08	2.77	1.14	1.17	2.52	21.24
XV-9642P 153 Auwhlg	77060	6	Glastropfen	G	66.62	2.71	0.96	0.17	1.97	19.72
XV-9643P 154 Auwhlg	77088	28	Glastropfen	G	64.30	1.88	0.76	0.22	2.12	23.64
XV-9644P 155 whlg	75246	31	Glastropfen	G	62.81	2.46	0.80	0.09	1.80	24.60
XV-10321	78179	185	Glasbrocken	B	69.14	1.05	0.83	4.95	0.44	11.01
XV-9734P 125 whlg	78249	1	Glasbrocken	B	72.60	0.76	0.43	0.76	0.49	15.61
XV-9735P 124 whlg	77575		Glasbrocken	B	64.56	2.32	1.02	0.60	2.06	21.84
XV-10402	77077	168	Glasbrocken	F	69.14	1.23	0.23	0.77	1.55	13.99
XV-10430	78269	39	Glasbrocken	F	68.84	1.04	0.21	0.50	1.49	16.50
XV-9724P 116 whlg	77501		Glasbrocken	F	72.74	0.95	0.21	0.48	1.26	9.20
XV-9725P 117 whlg	77077	15	Glasbrocken	F	69.39	1.19	0.26	0.73	1.51	13.62
XV-9726P 118 whlg	77077	15	Glasbrocken	F	64.83	1.51	0.41	0.87	1.99	18.14
XV-9729P 121 whlg	75214		Glasbrocken	F	74.35	0.40	0.14	0.19	0.75	10.95

Na <sub>2</sub> O wt.-%	K <sub>2</sub> O wt.-%	TiO <sub>2</sub> wt.-%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wt.-%	Ba ppm	Co ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sn ppm	Sr ppm	Zn ppm	Zr ppm	Proben-Nr. Geochem. Lab.
0.64	6.57	0.13	1.17	800	20	72	74	156	762	81	192	166	121	XV-10406
0.70	6.58	0.13	1.18	790	32	59	67	153	798	27	216	153	141	XV-10407
0.15	5.12	0.16	1.42	335	14	76	103	138	804	120	140	156	122	XV-10412
2.25	4.10	0.23	1.78	1220	83	64	1520	66	462	105	319	208	222	XV-10414
0.75	4.11	0.18	1.70	445	6	51	128	80	516	30	279	186	156	XV-10415
0.79	8.75	0.17	0.82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	XV-10320
0.19	6.75	0.23	1.40	775	390	6	114	148	5310	21	167	146	192	XV-10386
<	4.96	0.37	1.33	415	345	126	503	131	120	24	188	199	238	XV-9628P 139 shlg
<	6.62	0.16	1.36	405	329	124	496	119	114	51	273	157	135	XV-9634P 138 whlg
0.24	5.23	0.18	1.25	460	363	149	789	120	84	42	187	162	146	XV-9730P 143 whlg
0.45	14.16	0.12	0.60	520	42	80	66	294	204	33	158	99	144	XV-9732P 141 whlg
0.36	11.06	0.14	1.28	190	441	142	628	157	126	51	169	173	141	XV-9733P 140 whlg
0.41	11.24	0.20	0.40	635	54	5	49	240	8622	<	154	76	237	XV-10378
0.31	11.64	0.17	0.73	1000	39	59	85	237	1332	33	195	127	155	XV-10395
0.33	10.37	0.19	0.68	1030	60	67	154	204	1182	24	203	118	177	XV-10419
0.43	10.61	0.12	0.49	670	47	67	110	195	1284	21	81	94	137	XV-10436
0.48	9.55	0.14	0.86	425	3	52	48	171	174	21	172	92	144	XV-9632P 136 whlg
0.37	10.42	0.13	1.06	725	24	56	85	164	120	54	289	145	113	XV-9633P 137 whlg
0.37	5.65	0.15	1.47	275	377	128	723	104	108	12	262	265	100	XV-9731P 142 whlg
0.27	4.36	0.16	1.96	555	15	65	54	141	432	45	220	238	148	XV-10373
0.41	10.27	0.16	0.62	795	48	62	46	201	1266	18	198	121	155	XV-10391
0.23	4.65	0.18	2.50	620	44	68	44	124	654	<	196	214	152	XV-10422
<	5.23	0.35	1.52	290	36	60	31	117	102	60	213	215	209	XV-9621P 126 whlg
0.25	5.13	0.15	1.86	415	21	67	85	119	72	45	370	268	161	XV-9622P 127 whlg
0.32	4.65	0.24	1.68	190	41	60	27	100	78	33	226	226	203	XV-9623P 128 whlg
0.24	5.75	0.17	1.46	140	27	58	24	123	84	24	163	162	157	XV-9624P 129 whlg
0.27	5.20	0.19	1.47	245	56	68	28	133	96	21	277	222	169	XV-9625P 130 whlg
0.30	6.80	0.35	1.16	490	35	62	74	168	126	33	195	148	217	XV-9626P 132 whlg
<	5.23	0.25	1.03	205	38	68	33	171	42	9	160	108	186	XV-9627P 131 whlg
0.31	5.30	0.62	1.68	145	42	65	41	129	84	57	202	192	271	XV-9629P 133 whlg
<	5.46	0.43	1.12	160	68	75	24	127	156	48	171	<	244	XV-9630P 134 whlg
0.32	4.92	0.36	1.71	140	30	66	22	112	78	24	241	192	239	XV-9631P 135 whlg
0.29	4.76	0.19	1.46	790	390	7	104	118	4290	<	132	146	151	XV-10384
0.64	8.34	0.18	0.91	1675	254	88	540	186	1272	156	148	124	174	XV-10428
0.33	6.02	0.15	1.45	400	375	127	635	128	72	39	371	275	140	XV-9645P 156 whlg
0.25	4.77	0.49	1.58	165	852	248	1226	126	42	33	220	280	281	XV-9646P 157 whlg
<	6.10	0.44	1.13	310	434	112	614	161	60	45	131	146	217	XV-9647P 158 whlg
<	4.56	0.29	1.26	1235	44	54	166	134	186	33	141	137	168	XV-9649P 160 whlg
0.20	10.37	0.14	0.54	680	56	60	90	188	1278	21	87	151	194	XV-10359
0.44	12.48	0.12	0.54	530	48	59	269	191	1572	<	140	74	139	XV-10376
0.58	9.13	0.15	0.81	835	14	53	113	189	1140	96	117	97	149	XV-10401
0.28	12.34	0.15	0.70	735	45	63	88	205	1446	75	199	109	149	XV-10408
0.32	12.10	0.11	0.55	245	59	63	72	218	204	48	82	<	164	XV-9648P 159 whlg
<	13.08	0.13	0.75	280	44	65	55	200	294	6	152	96	134	XV-9650P 161 whlg
0.26	11.07	0.16	0.83	340	53	68	58	183	174	48	157	109	157	XV-9651P 162 whlg
0.35	4.86	0.17	1.73	470	56	62	64	111	528	66	208	173	154	XV-10360
0.23	4.53	0.19	1.66	270	23	58	26	60	468	39	299	177	179	XV-10400
0.27	4.92	0.19	1.55	530	81	86	106	108	54	42	238	209	148	XV-9635P 146 whlg
<	5.00	0.49	1.53	155	53	52	39	151	72	21	210	178	226	XV-9636P 147 Auwhlg
0.44	5.33	0.18	1.86	175	90	62	22	110	192	33	227	246	155	XV-9637P 148 Auwhlg
0.28	5.72	0.23	1.69	170	21	66	20	98	84	30	518	289	186	XV-9638P 149 Auwhlg
0.28	5.57	0.16	1.42	225	27	56	34	126	96	33	208	210	113	XV-9639P 150 Auwhlg
0.22	4.72	0.19	1.33	265	71	74	37	119	54	33	185	191	178	XV-9640P 151
0.25	6.06	0.22	1.29	440	26	67	47	157	150	21	149	146	183	XV-9641P 152 Auwhlg
0.49	5.12	0.53	1.42	175	47	67	58	110	66	30	237	224	256	XV-9642P 153 Auwhlg
0.29	4.95	0.17	1.47	190	65	58	24	116	90	36	180	205	124	XV-9643P 154 Auwhlg
0.25	5.22	0.22	1.54	100	29	69	30	80	186	30	266	189	164	XV-9644P 155 whlg
0.99	10.26	0.14	0.05	1825	464	172	1322	348	1350	72	69	258	145	XV-10321
1.36	7.09	0.20	0.28	465	308	106	338	130	120	24	80	107	217	XV-9734P 125 whlg
0.23	4.97	0.50	1.56	320	371	151	546	111	90	48	234	252	271	XV-9735P 124 whlg
0.36	11.05	0.21	0.67	1270	30	79	204	218	1308	45	169	116	145	XV-10402
0.41	9.51	0.16	0.63	940	65	53	124	193	1182	39	166	80	154	XV-10430
0.35	13.94	0.12	0.58	345	45	65	22	211	330	12	177	97	117	XV-9724P 116 whlg
0.29	11.77	0.18	0.73	465	33	64	98	180	264	39	161	90	120	XV-9725P 117 whlg
0.25	10.49	0.16	0.93	505	33	68	26	172	132	9	172	134	148	XV-9726P 118 whlg
0.24	12.25	0.11	0.40	60	36	68	27	205	240	27	71	<	156	XV-9729P 121 whlg

Proben-Nr. Geochem. Lab.	Inv.-Nr. ADB	pièce	Kategorie	Farbe	SiO <sub>2</sub> wt.-%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	MnO wt.-%	MgO wt.-%	CaO wt.-%
XV-9737P 122 whlg	75214		Glasbrocken	F	71.24	0.42	0.17	0.36	1.37	11.84
XV-10399	77053	42	Glasbrocken	G	59.18	2.57	0.91	0.21	2.26	24.79
XV-9680P 106 whlg	75524	28	Glasbrocken	G	65.47	2.38	0.77	0.19	1.93	22.47
XV-9681P 107 whlg	75524	28	Glasbrocken	G	62.86	2.92	1.00	0.15	2.27	22.75
XV-9682P 108 whlg	75524	28	Glasbrocken	G	62.38	2.84	1.05	0.14	2.19	23.63
XV-9700P 109 whlg	75524	28	Glasbrocken	G	65.11	2.06	0.66	0.23	2.01	22.63
XV-9701P 110 whlg	75523	85	Glasbrocken	G	64.31	2.29	0.77	0.11	2.13	23.40
XV-9702P 111 whlg	75523	85	Glasbrocken	G	64.18	2.40	0.80	0.11	2.16	23.57
XV-9703P 112 whlg	77024		Glasbrocken	G	64.74	2.12	0.78	0.17	2.02	22.92
XV-9704P 113 whlg	77024		Glasbrocken	G	63.79	2.13	0.87	0.18	1.83	23.76
XV-9722P 114 whlg	77032		Glasbrocken	G	63.35	3.05	1.12	0.12	2.26	22.81
XV-9723P 115 whlg	77575		Glasbrocken	G	64.58	1.91	0.80	0.14	1.87	22.50
XV-9728P 120 whlg	77567		Glasbrocken	R	63.60	3.30	1.06	0.15	1.83	21.95
XV-9736P 123 whlg	75441		Glasbrocken	Rs	66.43	1.07	0.29	0.74	1.88	16.65
XV-9727P 119 whlg	77575		Glasbrocken	W	61.69	0.45	0.14	0.37	1.26	16.51
XV-9781P 190	75214		Glasfritte	B	64.21	3.82	0.74	0.20	2.22	22.44
XV-9798P 186	75216	62	Glasfritte	B	66.88	3.93	0.85	0.23	1.94	19.97
XV-9799P 187	75216	62	Glasfritte	B	64.50	3.73	0.86	0.43	1.91	21.90
XV-9800P 188	75223	24	Glasfritte	B	63.27	3.46	0.87	0.19	2.16	22.98
XV-9801P 189	77508		Glasfritte	B	64.96	3.40	0.78	0.19	2.02	21.63
XV-9802P 191	75214		Glasfritte	B	63.87	3.97	0.82	0.27	2.04	22.30
XV-9803P 192	n.n.		Glasfritte	B	68.97	4.66	0.82	0.25	1.58	16.37
XV-9804P 193	n.n.		Glasfritte	B	71.47	5.73	0.63	0.18	1.50	14.44
XV-9805P 194	n.n.		Glasfritte	B	64.13	4.18	0.77	0.27	2.18	21.56
XV-9706P 4 whlg	n.n.		Glasfritte	G	63.21	2.11	0.80	0.17	1.91	24.22
XV-9708P 6 whlg	n.n.		Glasfritte	G	62.64	2.40	1.57	0.10	2.08	22.77
XV-9778P 170	n.n.		Glasfritte	G	68.01	2.54	0.56	0.33	1.70	18.08
XV-9789P 171	n.n.		Glasfritte	G	77.08	8.78	1.04	0.05	0.94	7.04
XV-9777P 166	75551	1	Glasfritte	Gr	66.76	4.03	0.96	0.27	2.51	16.66
XV-9780P 185	n.n.		Glasfritte	Gr	70.86	6.74	0.86	0.22	1.65	13.52
XV-9786P 167	75551	1	Glasfritte	Gr	67.15	3.92	0.96	0.28	2.54	16.24
XV-9787P 168	75551	1	Glasfritte	Gr	64.91	3.63	0.87	0.26	2.43	19.36
XV-9788P 169	n.n.		Glasfritte	Gr	65.22	2.99	0.91	0.16	1.97	21.84
XV-9791P 177	75248	20	Glasfritte	Gr	68.37	2.57	0.63	0.15	1.84	19.13
XV-9792P 178	75248	20	Glasfritte	Gr	67.43	3.19	0.73	0.34	1.72	19.69
XV-9792P 179	75216	62	Glasfritte	Gr	67.33	3.21	0.72	0.33	1.78	19.71
XV-9793P 180	75216	62	Glasfritte	Gr	65.71	3.34	0.74	0.25	1.93	21.07
XV-9794P 181	n.n.		Glasfritte	Gr	66.82	2.71	0.69	0.19	1.78	20.96
XV-9795P 182	n.n.		Glasfritte	Gr	65.37	2.66	0.67	0.19	2.12	22.17
XV-9796P 183	n.n.		Glasfritte	Gr	67.66	2.71	0.71	0.18	1.74	19.99
XV-9797P 184	n.n.		Glasfritte	Gr	68.27	3.52	0.76	0.20	1.73	18.66
XV-9790P 176	75248	20	Glasfritte	N	85.36	7.80	0.58	0.04	0.38	2.35
XV-9705P 3 whlg	n.n.		Glasfritte	W	64.98	0.96	0.25	0.59	2.67	21.78
XV-9707P 5 whlg	n.n.		Glasfritte	x	65.87	2.76	1.05	0.24	2.00	21.01
XV-9806P 195	n.n.		Glasfritte	x	71.12	6.51	0.77	0.14	1.55	14.90
XV-9809P 218	75222		Ofenwand		90.19	7.22	0.40	0.02	0.15	0.68
XV-9842P 216	75212		Ofenwand		90.51	7.87	0.45	0.01	0.15	0.26
XV-9843P 217	75212		Ofenwand		89.48	7.12	1.01	0.01	0.36	0.30
XV-9844P 196a	75238		Ofenwand		84.12	9.31	0.59	0.04	0.30	2.11
XV-9845P 196b	75238		Ofenwand		88.00	9.70	0.58	0.01	0.10	0.62
XV-9846P 197a	75467		Ofenwand		88.92	9.11	0.51	0.01	0.12	0.30
XV-9847P 197b	75467		Ofenwand		85.34	9.44	0.56	0.02	0.24	1.65
XV-9848P 198a	75212		Ofenwand		87.46	9.49	0.41	0.01	0.13	0.65
XV-9849P 198b	75212		Ofenwand		86.12	9.35	0.48	0.03	0.14	0.67
XV-9850P 199a	75239		Ofenwand		83.50	9.35	0.54	0.03	0.27	1.49
XV-9851P 199b	75239		Ofenwand		89.56	8.40	0.48	0.01	0.15	0.34
XV-9853P 200a	75212		Ofenwand		89.80	8.17	0.48	0.01	0.11	0.38
XV-9854P 200b	75212		Ofenwand		88.45	8.01	0.45	0.02	0.10	0.41
XV-9855P 200c	75212		Ofenwand		88.79	8.00	0.44	0.01	0.11	0.35
XV-9856P 200d	75212		Ofenwand		87.60	8.66	0.46	0.02	0.13	0.43
XV-9857P 200e	75212		Ofenwand		83.91	10.13	0.58	0.04	0.17	0.74
XV-9869P 219	75447		Ofenwand		90.16	6.39	0.89	0.01	0.38	0.42
XV-9870P 220	75565		Ofenwand		88.50	7.35	1.12	0.01	0.41	0.55
XV-9871P 251a	75423		Glashafen		84.40	10.92	0.54	0.01	0.21	1.04
XV-9872P 251b	75423		Glashafen		86.29	11.37	0.60	0.02	0.10	0.36
XV-9873P 251c	75423		Glashafen		83.02	10.52	0.53	0.03	0.24	1.60



Na <sub>2</sub> O wt.-%	K <sub>2</sub> O wt.-%	TiO <sub>2</sub> wt.-%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wt.-%	Ba ppm	Co ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sn ppm	Sr ppm	Zn ppm	Zr ppm	Proben-Nr. Geochem. Lab.
0.33	13.33	0.11	0.53	175	30	58	36	368	186	18	67	<	179	XV-9737P 122 whlg
0.47	6.69	0.32	1.95	760	39	77	56	134	756	96	335	193	179	XV-10399
<	4.76	0.18	1.63	150	39	63	44	107	198	36	195	223	161	XV-9680P 106 whlg
<	6.12	0.25	1.45	165	21	73	26	149	162	27	162	116	203	XV-9681P 107 whlg
<	5.92	0.23	1.40	150	48	58	16	165	90	21	186	153	193	XV-9682P 108 whlg
0.22	4.99	0.16	1.71	180	56	73	24	115	36	27	167	172	169	XV-9700P 109 whlg
0.21	5.01	0.39	1.14	145	44	53	36	160	102	21	109	96	251	XV-9701P 110 whlg
0.19	4.80	0.40	1.13	170	26	59	41	158	48	21	109	93	267	XV-9702P 111 whlg
0.21	5.04	0.17	1.56	230	29	59	34	129	114	24	240	261	160	XV-9703P 112 whlg
0.40	4.79	0.40	1.53	215	42	68	108	85	90	30	312	215	226	XV-9704P 113 whlg
0.26	5.25	0.23	1.35	190	39	61	44	149	108	27	182	154	189	XV-9722P 114 whlg
0.30	5.50	0.47	1.60	115	9	58	40	112	120	18	282	248	261	XV-9723P 115 whlg
0.29	4.99	0.60	1.94	290	47	60	30	83	132	39	378	285	307	XV-9728P 120 whlg
0.42	10.96	0.28	0.84	390	44	78	65	181	126	21	135	115	123	XV-9736P 123 whlg
0.84	11.94	0.09	6.33	75	59	54	14	178	180	18	93	<	114	XV-9727P 119 whlg
0.12	4.49	0.49	1.06	155	89	66	16	93	132	27	179	62	254	XV-9781P 190
0.22	4.55	0.29	1.07	155	89	80	10	98	156	45	185	<	174	XV-9798P 186
0.11	4.37	0.56	1.35	235	86	49	17	96	246	12	236	59	295	XV-9799P 187
0.25	4.59	0.53	1.60	170	87	58	56	101	48	12	196	<	262	XV-9800P 188
0.18	5.10	0.43	1.12	185	60	51	14	131	108	21	166	92	254	XV-9801P 189
0.19	4.29	0.58	1.42	195	92	65	32	100	54	36	228	66	285	XV-9802P 191
0.17	5.51	0.53	0.95	225	60	76	15	116	108	36	155	66	240	XV-9803P 192
0.14	4.75	0.47	0.45	140	77	56	22	123	66	24	225	50	269	XV-9804P 193
0.21	4.67	0.54	1.24	215	75	67	21	108	78	12	207	81	278	XV-9805P 194
0.27	4.86	0.47	1.74	175	36	71	24	92	108	24	220	216	282	XV-9706P 4 whlg
0.65	6.06	0.29	1.16	130	5	88	26	118	66	45	185	175	143	XV-9708P 6 whlg
0.29	6.73	0.22	1.44	265	33	64	68	123	114	12	200	87	166	XV-9778P 170
0.10	3.46	0.77	0.53	150	57	70	34	85	156	33	70	58	336	XV-9789P 171
0.26	6.82	0.31	1.30	245	48	53	8	133	102	33	210	<	221	XV-9777P 166
0.17	4.21	0.70	0.86	215	114	63	18	98	72	33	169	78	303	XV-9780P 185
0.22	6.86	0.30	1.29	200	63	74	30	133	138	24	217	78	195	XV-9786P 167
0.26	6.55	0.29	1.22	215	45	47	27	119	144	39	213	60	182	XV-9787P 168
0.22	4.73	0.24	1.45	205	17	69	30	105	126	30	283	147	143	XV-9788P 169
0.22	5.45	0.29	1.22	140	29	44	20	113	102	21	163	90	180	XV-9791P 177
0.23	5.19	0.28	1.08	250	59	52	36	118	150	36	276	118	191	XV-9792P 178
0.24	5.21	0.29	1.08	260	104	59	44	118	90	12	300	<	182	XV-9792P 179
0.25	5.16	0.29	1.15	185	54	52	33	120	138	27	202	119	186	XV-9793P 180
0.23	5.02	0.25	1.25	115	8	67	28	114	60	21	161	146	168	XV-9794P 181
0.35	4.87	0.21	1.28	200	17	68	18	112	60	21	204	98	157	XV-9795P 182
0.26	5.40	0.29	0.97	155	39	52	22	123	108	15	173	<	187	XV-9796P 183
0.24	4.95	0.28	1.28	215	44	62	23	106	144	21	251	106	176	XV-9797P 184
<	2.19	0.92	0.21	130	57	50	4	49	78	9	89	39	377	XV-9790P 176
<	7.14	0.11	1.17	485	35	53	19	114	84	18	343	146	120	XV-9705P 3 whlg
0.22	5.23	0.22	1.23	180	45	58	28	142	138	27	186	117	187	XV-9707P 5 whlg
0.10	3.45	0.66	0.61	135	105	70	2	89	114	30	134	71	281	XV-9806P 195
0.11	0.51	0.50	0.04	55	62	73	39	<	162	18	33	<	291	XV-9809P 218
<	0.15	0.47	0.03	80	39	82	18	<	48	18	39	37	255	XV-9842P 216
0.09	0.43	0.97	0.03	50	44	70	37	28	54	18	59	70	436	XV-9843P 217
0.23	2.52	0.58	0.11	80	39	62	20	55	78	9	167	<	278	XV-9844P 196a
<	0.23	0.59	0.04	115	14	59	24	<	48	27	48	<	280	XV-9845P 196b
0.10	0.16	0.56	0.04	80	38	71	24	<	72	24	50	<	286	XV-9846P 197a
<	1.51	0.57	0.24	45	44	62	36	45	48	30	46	41	272	XV-9847P 197b
<	0.84	0.59	0.04	125	81	62	15	20	<	45	52	43	284	XV-9848P 198a
0.23	2.19	0.59	<	95	56	64	20	<	60	21	<	<	283	XV-9849P 198b
0.19	3.45	0.61	0.07	130	105	64	28	73	6	33	36	63	256	XV-9850P 199a
<	0.24	0.59	0.04	70	44	67	12	20	12	21	34	<	316	XV-9851P 199b
<	0.17	0.58	0.03	75	59	76	18	18	30	24	38	47	318	XV-9853P 200a
0.09	1.48	0.59	0.04	115	111	69	27	24	<	39	<	59	288	XV-9854P 200b
<	1.54	0.59	0.04	60	36	55	23	42	54	36	39	68	323	XV-9855P 200c
<	1.77	0.58	0.04	90	104	55	23	38	36	27	<	44	266	XV-9856P 200d
0.30	3.19	0.65	0.05	100	90	65	32	59	60	30	<	<	248	XV-9857P 200e
0.09	0.39	0.88	0.05	110	90	78	40	20	60	15	26	56	355	XV-9869P 219
<	0.63	1.00	0.05	80	74	76	29	27	12	33	26	77	394	XV-9870P 220
0.11	1.56	0.75	0.05	110	134	68	18	46	42	18	38	57	340	XV-9871P 251a
<	0.24	0.76	0.04	70	105	63	24	<	24	24	32	47	307	XV-9872P 251b
<	2.49	0.71	0.09	90	89	57	44	69	60	42	26	51	292	XV-9873P 251c

Proben-Nr. Geochem. Lab.	Inv.-Nr. ADB	pièce	Kategorie	Farbe	SiO <sub>2</sub> wt.-%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	MnO wt.-%	MgO wt.-%	CaO wt.-%
XV-9874P 252a	75205		Glashafen		83.56	10.66	0.42	0.02	0.20	1.49
XV-9875P 252b	75205		Glashafen		86.99	11.16	0.43	0.01	0.09	0.25
XV-9876P 252c	75205		Glashafen		82.11	10.63	0.42	0.03	0.26	2.01
XV-9877P 253a	75244		Glashafen		84.43	9.65	0.40	0.03	0.22	1.53
XV-9878P 253b	75244		Glashafen		87.50	10.40	0.52	0.01	0.11	0.20
XV-9879P 253c	75244		Glashafen		84.57	9.99	0.41	0.02	0.16	0.99
XV-9880P 254a	75248		Glashafen		86.00	8.67	0.61	0.05	0.31	1.86
XV-9881P 254b	75248		Glashafen		88.96	9.21	0.51	0.01	0.09	0.20
XV-9882P 254c	75248		Glashafen		85.94	8.90	0.51	0.03	0.20	1.17
XV-9884P 255b	75526		Glashafen		86.45	10.03	0.54	0.01	0.23	0.40
XV-9885P 255c	75526		Glashafen		87.40	10.15	0.51	0.01	0.22	0.25
XV-9886P 256a	75238		Glashafen		81.62	10.00	0.41	0.09	0.34	2.59
XV-9887P 256b	75238		Glashafen		86.81	11.16	0.40	0.01	0.09	0.26
XV-9888P 256c	75238		Glashafen		83.81	10.62	0.46	0.02	0.22	1.38
XV-9890P 257b	75212		Glashafen		86.72	11.25	0.44	0.01	0.11	0.29
XV-9891P 257c	75212		Glashafen		82.70	10.33	0.41	0.03	0.27	2.04
XV-9892P 258a	77508		Glashafen		86.26	8.52	0.22	0.02	0.19	1.15
XV-9893P 258b	77508		Glashafen		89.64	8.88	0.29	0.01	<	0.16
XV-9894P 258c	77508		Glashafen		84.95	8.42	0.40	0.04	0.28	1.53
XV-9895P 259a	77508		Glashafen		83.48	9.48	0.47	0.02	0.22	1.05
XV-9896P 259b	77508		Glashafen		87.90	9.95	0.47	0.01	0.21	0.30
XV-9897P 259c	77508		Glashafen		80.26	8.47	0.44	0.03	0.38	4.60
XV-9898P 260a	77504		Glashafen		85.40	8.96	0.26	0.03	0.18	0.88
XV-9899P 260b	77504		Glashafen		89.22	9.10	0.19	0.01	0.10	0.16
XV-9900P 260c	77504		Glashafen		79.22	7.75	0.36	0.10	0.56	4.26
XV-9683P Hup-01 whlg	n.n.		Huppererde, Souboz		95.70	1.93	0.08	<	<	0.57
XV-9684P Hup-02 whlg	n.n.		Huppererde, Souboz		95.57	1.85	0.11	0.01	0.12	2.05
XV-9685P Hup-03 whlg	n.n.		Huppererde, Souboz		87.69	4.58	0.26	0.01	0.09	3.15
XV-9686P Hup-04 whlg	n.n.		Huppererde, Souboz		86.67	8.79	0.18	0.01	0.09	0.08
XV-9687P Hup-05 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Pâturage de Mont-Girod		96.77	2.06	0.04	0.01	<	0.03
XV-9688P Hup-06 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Pâturage de Mont-Girod		89.21	7.35	0.10	0.01	0.08	0.05
XV-9689P Hup-07 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Pâturage de Mont-Girod		91.26	4.97	0.09	<	0.08	0.04
XV-9690P Hup-08 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Mont-Girod, Lac Vert		98.05	0.90	0.09	0.01	<	0.03
XV-9691P Hup-09 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Mont-Girod, Lac Vert		96.77	2.27	0.18	<	0.06	0.02
XV-9692P Hup-10 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Mont-Girod, Lac Vert		98.75	0.64	0.03	0.01	<	0.01
XV-9693P Hup-11 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Mont-Girod, Lac Vert		95.82	2.59	0.11	0.01	0.08	0.03
XV-9694P Hup-12 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Mont-Girod, Lac Vert		95.86	2.91	0.05	0.01	0.09	0.03
XV-9695P Hup-13 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Mont-Girod, Lac Vert		95.47	3.00	0.05	0.01	0.06	0.03
XV-9696P Hup-14 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Mont-Girod, Lac Vert		96.15	2.63	0.13	0.01	0.14	0.06
XV-9697P Hup-16 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Petit Pré		98.45	0.41	0.03	0.01	0.06	0.02
XV-9698P Hup-17 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Petit Pré		95.36	2.35	0.36	0.01	0.10	0.06
XV-9699P Hup-18 whlg	n.n.		Huppererde, Court, Petit Pré		95.89	1.42	0.36	0.02	0.09	0.07
XV-9718P Hup-00 whlg	n.n.		Huppererde		98.28	0.83	0.06	0.01	0.06	0.04
XV-9858P 201	78247		Fragment Feuerungskanal		90.81	7.40	0.36	0.01	0.08	0.33
XV-9859P 202	78247		Fragment Feuerungskanal		89.09	9.31	0.37	0.01	0.08	0.17
XV-9860P 203	78247		Fragment Feuerungskanal		85.15	9.49	0.52	0.01	0.12	1.62
XV-9861P 204a	78247		Fragment Feuerungskanal		86.05	7.41	0.46	0.03	0.63	3.12
XV-9862P 204b	78247		Fragment Feuerungskanal		58.49	3.26	0.73	0.17	3.21	26.99
XV-9864P 206	78248		Fragment Feuerungskanal		50.55	3.05	1.54	0.14	1.98	33.74
XV-9865P 207	78248		Fragment Feuerungskanal		57.58	2.46	0.83	0.11	1.57	31.56
XV-9866P 208	78248		Fragment Feuerungskanal		90.46	7.26	0.42	0.01	0.12	0.55
XV-9867P 209	78248		Fragment Feuerungskanal		37.40	3.56	1.13	0.10	1.38	41.55
XV-9868P 210	78248		Fragment Feuerungskanal		46.68	4.95	1.67	0.12	1.36	35.60
XV-9901P 261	77017		Asche		55.10	6.13	2.55	0.26	1.41	16.45
XV-9902P 262	77016		Asche		76.97	4.06	2.22	0.09	0.71	6.72
XV-9903P 263	77014		Asche		43.31	5.18	2.14	0.22	1.08	13.79
XV-9904P 264	77015		Asche		60.66	6.71	2.46	0.12	1.07	13.34
XV-9905P 265	77007		Asche		66.82	7.43	3.01	0.28	1.06	8.67
XV-9816P 226	78235		Ton		75.76	12.45	4.26	0.07	1.48	2.37
XV-9817P 227	78235		Ton		77.04	12.58	4.11	0.06	1.47	1.20
XV-9818P 228	78242		Ton		75.70	12.46	5.05	0.12	1.26	1.81
XV-9819P 229	78242		Ton		74.93	12.50	5.04	0.14	1.23	2.61
XV-9820P 230	78242		Ton		75.46	12.73	5.23	0.15	1.19	1.74

Na <sub>2</sub> O wt.-%	K <sub>2</sub> O wt.-%	TiO <sub>2</sub> wt.-%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wt.-%	Ba ppm	Co ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sn ppm	Sr ppm	Zn ppm	Zr ppm	Proben-Nr. Geochem. Lab.
0.12	2.31	0.59	0.08	35	204	65	46	47	42	33	37	40	288	XV-9874P 252a
<	0.17	0.62	0.03	45	56	71	24	19	54	12	39	53	322	XV-9875P 252b
0.18	2.86	0.58	0.12	75	143	54	31	69	60	42	52	54	299	XV-9876P 252c
0.13	2.30	0.65	0.08	60	89	77	14	78	180	30	41	41	303	XV-9877P 253a
0.10	0.14	0.72	0.04	175	51	86	45	<	24	42	23	<	290	XV-9878P 253b
0.11	2.52	0.69	0.05	95	140	67	12	70	84	21	33	43	300	XV-9879P 253c
0.10	1.25	0.57	0.19	125	114	56	12	44	78	24	60	65	305	XV-9880P 254a
0.09	0.08	0.57	0.04	45	56	64	16	<	30	30	24	48	323	XV-9881P 254b
0.37	2.09	0.55	0.05	70	72	75	18	39	42	39	58	<	318	XV-9882P 254c
0.13	0.89	0.81	0.04	90	117	64	26	32	102	45	28	<	349	XV-9884P 255b
0.13	0.27	0.81	0.03	115	59	82	32	19	30	18	49	44	393	XV-9885P 255c
0.27	3.57	0.56	0.15	105	116	73	38	64	90	21	62	<	299	XV-9886P 256a
<	0.23	0.62	0.04	120	53	51	46	<	66	21	33	45	288	XV-9887P 256b
0.21	2.24	0.60	0.10	175	93	75	26	45	126	30	<	<	304	XV-9888P 256c
<	0.25	0.62	0.04	75	72	68	42	<	54	39	47	68	323	XV-9890P 257b
0.22	2.99	0.58	0.11	170	57	57	20	65	102	24	66	<	319	XV-9891P 257c
<	2.69	0.64	<	90	36	59	17	70	102	30	54	<	346	XV-9892P 258a
<	0.21	0.67	<	135	18	67	22	<	6	15	<	<	351	XV-9893P 258b
0.18	2.50	0.63	0.15	120	149	53	45	77	60	21	46	63	353	XV-9894P 258c
0.20	3.67	0.58	0.06	65	225	62	16	98	78	39	55	<	331	XV-9895P 259a
<	0.37	0.61	0.04	75	65	53	26	<	12	9	52	47	341	XV-9896P 259b
0.21	3.00	0.54	0.26	105	84	71	12	81	42	9	66	<	321	XV-9897P 259c
0.22	3.16	0.60	0.07	35	105	65	22	93	36	33	<	<	339	XV-9898P 260a
<	0.43	0.62	0.03	115	99	61	18	<	84	6	34	45	319	XV-9899P 260b
0.31	6.11	0.53	0.25	110	153	56	9	174	150	27	<	<	295	XV-9900P 260c
<	0.04	0.16	<	60	36	77	14	<	30	12	<	<	165	XV-9683P Hup-01 whlg
<	0.04	0.15	0.04	100	48	50	28	<	30	18	<	<	148	XV-9684P Hup-02 whlg
<	0.04	0.29	<	40	26	49	20	<	48	42	<	39	178	XV-9685P Hup-03 whlg
0.09	0.08	0.47	0.03	110	20	74	34	<	36	15	30	37	223	XV-9686P Hup-04 whlg
<	0.05	0.27	<	65	77	61	12	<	48	42	<	<	193	XV-9687P Hup-05 whlg
0.10	0.10	0.23	0.02	55	5	68	36	<	18	60	23	44	141	XV-9688P Hup-06 whlg
<	0.03	1.53	0.07	60	26	51	42	17	66	30	64	<	556	XV-9689P Hup-07 whlg
0.09	0.04	0.24	0.03	80	50	64	12	<	42	30	24	<	349	XV-9690P Hup-08 whlg
<	0.08	0.13	0.02	30	41	60	24	<	84	42	28	41	120	XV-9691P Hup-09 whlg
<	0.03	0.13	0.02	25	59	65	22	<	30	54	<	38	158	XV-9692P Hup-10 whlg
0.15	0.17	0.19	0.03	20	48	56	16	<	<	30	27	37	240	XV-9693P Hup-11 whlg
0.11	0.09	0.20	0.02	70	14	62	26	<	18	24	34	<	228	XV-9694P Hup-12 whlg
<	0.04	0.19	0.02	105	32	50	26	<	54	39	<	<	182	XV-9695P Hup-13 whlg
<	0.24	0.23	0.03	70	14	64	32	<	96	27	<	<	227	XV-9696P Hup-14 whlg
<	0.03	0.18	<	175	8	46	14	<	18	21	26	42	153	XV-9697P Hup-16 whlg
0.11	0.10	0.33	0.03	150	48	83	28	<	96	45	35	41	225	XV-9698P Hup-17 whlg
0.13	0.08	0.24	<	20	29	43	26	<	72	27	24	38	334	XV-9699P Hup-18 whlg
<	0.04	0.19	0.02	60	56	61	35	<	48	36	<	<	327	XV-9718P Hup-00 whlg
<	0.15	0.52	0.03	<	53	71	42	<	36	27	50	39	302	XV-9858P 201
0.13	0.08	0.57	0.03	<	62	70	30	<	36	18	42	51	333	XV-9859P 202
0.09	0.18	0.57	0.05	<	74	80	48	<	72	21	42	<	272	XV-9860p 203
<	1.22	0.51	0.33	<	35	69	39	18	66	36	42	46	279	XV-9861P 204a
0.23	3.63	0.25	1.09	<	47	58	28	79	132	33	216	<	184	XV-9862P 204b
0.31	4.41	0.23	1.22	<	47	74	24	120	78	48	203	<	143	XV-9864P 206
0.18	3.20	0.20	0.96	71	72	61	22	62	60	15	186	67	122	XV-9865P 207
<	0.22	0.50	0.04	<	101	64	14	<	54	21	<	<	295	XV-9866P 208
0.16	1.49	0.38	0.78	<	78	85	23	54	48	12	185	89	191	XV-9867P 209
0.25	3.47	0.37	0.86	<	27	59	39	121	72	18	206	97	220	XV-9868P 210
0.32	2.31	0.6	0.89	<	74	74	45	115	66	30	147	195	319	XV-9901P 261
0.23	1.27	0.78	0.39	<	36	80	40	53	96	24	100	96	313	XV-9902P 262
0.35	1.68	0.33	0.93	<	59	77	50	74	66	9	143	110	211	XV-9903P 263
0.33	1.99	0.48	0.90	<	57	83	40	92	72	24	144	131	265	XV-9904P 264
0.51	1.83	0.46	0.54	<	21	80	56	71	30	15	116	221	307	XV-9905P 265
0.77	1.98	0.61	0.14	<	15	138	43	94	96	21	86	135	314	XV-9816P 226
0.75	2.00	0.61	0.08	<	59	127	34	78	96	24	66	101	314	XV-9817P 227
0.91	1.60	0.78	0.17	<	18	94	48	82	48	9	93	119	503	XV-9818P 228
0.89	1.61	0.77	0.17	<	65	106	34	69	12	12	94	130	469	XV-9819P 229
0.92	1.48	0.81	0.16	<	98	93	27	70	30	3	100	115	559	XV-9820P 230

Proben-Nr. Geochem. Lab.	Inv.-Nr. ADB	pièce	Kategorie	Farbe	SiO <sub>2</sub> wt.-%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt.-%	MnO wt.-%	MgO wt.-%	CaO wt.-%
XV-9807P 211	75204		Ziegelstein		70.37	14.59	7.32	0.20	2.00	0.90
XV-9808P 215	75204		Ziegelstein		74.90	14.00	4.39	0.04	1.96	0.80
XV-9811P 221	78246		Ziegelstein		76.19	13.01	4.27	0.04	1.68	0.80
XV-9812P 222	78246		Ziegelstein		73.45	13.58	5.09	0.06	1.90	1.78
XV-9813P 223	78246		Ziegelstein		74.80	13.92	4.54	0.05	1.92	0.97
XV-9814P 224	78246		Ziegelstein		80.18	10.92	3.09	0.04	1.18	0.82
XV-9815P 225	78246		Ziegelstein		79.19	11.49	3.79	0.06	1.18	0.72
XV-9839P 212	75204		Ziegelstein		74.79	13.89	4.58	0.06	1.74	1.18
XV-9840P 213	75212		Ziegelstein		78.35	12.29	3.62	0.03	1.33	0.65
XV-9841P 214	75222		Ziegelstein		64.93	18.12	7.58	0.08	2.89	1.13
XV-9821P 231	75424		Keramik		76.61	14.20	4.53	0.03	0.71	0.52
XV-9822P 232	75424		Keramik		76.97	14.97	2.87	0.02	0.76	0.70
XV-9823P 233	75523		Keramik		78.58	13.88	2.61	0.01	0.62	0.72
XV-9824P 234	75523		Keramik		75.51	15.99	3.20	0.02	0.77	0.87
XV-9825P 235	75580		Keramik		77.72	15.00	2.97	0.01	0.55	0.41
XV-9826P 236	75580		Keramik		77.37	14.96	2.94	0.02	0.53	0.34
XV-9827P 237	78225		Keramik		76.91	14.89	2.51	0.02	0.71	0.85
XV-9828P 238	78225		Keramik		76.51	14.35	4.74	0.01	0.60	0.75
XV-9829P 239	78239		Keramik		67.86	16.44	9.06	0.06	1.60	0.33
XV-9830P 240	78239		Keramik		76.42	14.23	4.69	0.02	0.56	0.71
XV-9831P 241	75444		Keramik		77.54	14.97	2.54	0.02	0.60	0.61
XV-9832P 242	77575		Keramik		62.20	16.03	6.38	0.14	3.09	6.15
XV-9833P 243	77575		Keramik		74.80	15.89	3.14	0.01	0.87	0.68
XV-9834P 244	77575		Keramik		77.09	14.80	2.87	0.02	0.68	0.76
XV-9835P 245	77508		Keramik		64.32	15.19	5.93	0.09	2.28	1.05
XV-9836P 246	77508		Keramik		63.92	16.29	6.35	0.10	2.50	1.88
XV-9837P 247	77028		Keramik		66.39	18.94	6.32	0.05	1.73	0.40
XV-9838P 248	77504		Keramik		77.88	14.00	2.70	0.05	0.75	0.57

Chemische Analysen (Haupt- und NebenkompONENTEN, Spurenelemente) von 341 Proben von Court, Pâturage de l'Envers. Zu den Produktebezeichnungen, Farbcodes und Probenanzahl, siehe Abb. 72. Analysewerte, die in der Tabelle mit < gekennzeichnet sind, sind unter der Nachweisgrenze (s. dazu auch Kap. 4.2.2.1).



Na <sub>2</sub> O wt.-%	K <sub>2</sub> O wt.-%	TiO <sub>2</sub> wt.-%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wt.-%	Ba ppm	Co ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sn ppm	Sr ppm	Zn ppm	Zr ppm	Proben-Nr. Geochem. Lab.
0.49	3.30	0.64	0.10	<	65	138	35	136	<	24	69	163	251	XV-9807P 211
0.72	2.39	0.59	0.10	<	57	131	23	81	108	30	85	126	275	XV-9808P 215
0.73	2.44	0.63	0.11	<	86	110	26	101	48	15	70	160	285	XV-9811P 221
0.71	2.50	0.63	0.16	<	57	149	34	88	48	30	105	114	333	XV-9812P 222
0.65	2.31	0.59	0.13	<	74	158	28	85	54	15	82	129	289	XV-9813P 223
0.67	2.30	0.61	0.09	<	102	97	33	83	114	33	82	148	337	XV-9814P 224
0.82	1.94	0.62	0.09	<	80	114	42	74	30	33	69	106	326	XV-9815P 225
0.73	2.19	0.61	0.12	<	54	116	54	81	126	42	78	124	271	XV-9839P 212
0.69	2.16	0.68	0.09	<	95	109	61	92	78	15	66	159	293	XV-9840P 213
0.82	3.47	0.73	0.13	<	84	152	28	118	84	9	109	137	211	XV-9841P 214
0.23	2.37	0.61	0.09	<	87	77	43	106	6	45	82	<	270	XV-9821P 231
0.13	2.67	0.64	0.07	448	198	78	72	122	12	12	75	89	294	XV-9822P 232
0.11	2.63	0.55	0.06	391	42	83	69	128	114	24	88	76	256	XV-9823P 233
0.09	2.50	0.72	0.08	360	108	68	41	127	60	27	80	99	334	XV-9824P 234
0.13	2.36	0.61	0.05	269	75	71	39	117	54	42	81	68	316	XV-9825P 235
0.16	2.73	0.64	0.07	346	62	72	54	114	84	30	53	92	308	XV-9826P 236
0.16	3.12	0.62	0.05	348	77	73	52	127	<	18	79	89	266	XV-9827P 237
<	2.13	0.67	0.07	156	35	80	96	102	60	36	73	87	372	XV-9828P 238
0.35	3.54	0.52	0.10	<	155	85	112	145	66	9	96	144	203	XV-9829P 239
<	2.40	0.67	0.08	270	65	69	94	106	96	42	60	64	333	XV-9830P 240
0.17	2.58	0.63	0.07	304	50	75	55	107	78	36	67	74	313	XV-9831P 241
1.03	4.02	0.65	0.16	<	72	122	100	123	150	15	182	139	179	XV-9832P 242
0.14	3.36	0.70	0.05	244	120	85	68	160	132	36	88	90	281	XV-9833P 243
0.12	2.70	0.64	0.06	350	89	97	147	122	78	3	69	77	277	XV-9834P 244
0.95	4.54	0.64	0.21	<	81	152	20200	157	144	93	107	232	232	XV-9835P 245
0.87	4.48	0.67	0.21	<	113	146	11482	136	72	33	106	167	226	XV-9836P 246
0.98	4.34	0.57	0.13	<	96	78	137	188	126	18	137	149	204	XV-9837P 247
0.19	2.98	0.57	0.09	316	89	64	58	121	78	36	91	70	285	XV-9838P 248

## Annexe 3

### Archéométrie : techniques d'analyse des céramiques associées aux fours verriers

Giacomo Eramo

Afin d'éviter toute contamination de la pâte céramique dans le cadre des analyses de masse (XRD et XRF), les surfaces vitrifiées des échantillons ont été enlevées de manière mécanique. Les parties hétérogènes des échantillons ont été éliminées, afin d'obtenir des portions de composition homogène. Entre 5 et 10 g de chaque échantillon ont été moulus dans un mortier en carbure de tungstène (WC). Des lames minces de 30  $\mu\text{m}$  d'épaisseur ont ensuite été préparées pour l'analyse pétrographique au microscope optique et au microscope électronique à balayage.

#### Microscopie pétrographique

L'analyse pétrographique des lames minces a été réalisée au moyen d'un microscope pétrographique Carl Zeiss Axioskop 40 pol, afin d'observer la structure, la texture et la composition minéralogique et pétrographique des échantillons.

#### Diffraction aux rayons X

L'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X (diffractomètre Philips PW1800, radiation  $\text{CuK}\alpha$ , 40 kV - 40 mA,  $2^\circ$  -  $65^\circ$   $2\theta$ ) a été effectuée sur la poudre brute de chaque échantillon.

#### Fluorescence aux rayons X

Les analyses chimiques en masse ont été exécutées sur des pastilles en verre au moyen d'un spectromètre à fluorescence X de type Philips PW2400, équipé d'un tube à rayons X de Rh. Les pastilles de verre ont été fondues dans un four à induction Philips PERLX-2, en mélangeant dans un creuset 0,700 g de poudre d'échantillon calcinée avec 0,350 g de LiF et de 6,650 g de  $\text{B}_4\text{Li}_2\text{O}_7$ . La perte au feu a été déterminée par calcination de 2 g de poudre d'échantillon à  $1000^\circ\text{C}$  durant une heure.

#### SEM/EDS

Les images en électrons secondaires (SE) et les images en électrons rétrodiffusées (BSE) ont été prises avec un microscope électronique à balayage (SEM) FEI SIRION XL 30S FEG activé dans une gamme de 5-20 kV. Des compositions chimiques qualitatives et quantitatives ont été obtenues par la spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS), en utilisant un détecteur EDAX NEW-XL30. La précision et l'exactitude étaient déterminées après cinq mesures sur le même point d'analyse d'un fragment de verre standard Corning D. Des représentations cartographiques aux rayons X de Si, Al, K et Ca ont été exécutées (15 kV, temps d'acquisition = 11 h) sur les surfaces de fragments de creusets et de réfractaires pour en examiner la contamination chimique.

#### Spectrométrie UV/VIS

Le mélange de 50 g de chaque échantillon dissous dans une solution acide ( $\text{HF}:\text{H}_2\text{SO}_4$ , 1:1), et d'une solution tampon, a créé un complexe rouge en présence de fer. La concentration d'oxyde de fer  $\text{FeO}$  a été déterminée en multipliant la valeur d'absorption ( $\lambda = 528\text{ nm}$ ), obtenue par un spectromètre UVIKON XS, par le coefficient de régression calculé après calibration.

#### Analyse granulométrique

En tout, 21 lames minces de matériaux réfractaires (rapportées comme  $\zeta$  d'unité dans Eramo 2005), 43 tessons de creusets<sup>653</sup> et 5 lames minces de Huppererde (terre réfractaire : échantillons ER125, 136, 248, 250 et 255), de granulométrie distincte, ont été analysés. L'analyse granulométrique a été conduite au microscope pétrographique avec un compteur de points Swift & Sons (maille =  $\frac{1}{3}\text{ mm}$ ). Entre 500 et 600 points ont été comptés par

lame mince, ce qui constitue le comptage minimum nécessaire pour des analyses de routine<sup>654</sup>. Le diamètre maximum apparent des grains a été mesuré à l'aide d'un oculaire micrométrique à l'agrandissement de 10×. Les mêmes classes granulométriques ont été considérées pour le tamisage des échantillons de Huppererde. Les détails relatifs à la précision et à la comparabilité des données granulométriques obtenues au moyen des deux méthodes ont été développés par Eramo<sup>655</sup>.

#### **Magnétisation thermorémanente (TRM)**

Les tessons ont été réduits aux dimensions opportunes pour être insérés dans un cube de plastique amagnétique de 8 cm<sup>3</sup> de volume, rempli de plastiline blanche également amagnétique, pour éviter tout signal magnétique pendant la mesure. Pour chacun des 19 tessons de céramique à recuire, deux fragments ont été analysés. Les mesures ont été effectuées dans le Laboratoire de magnétisme ALP de l'Université de Turin. Les fragments ont subi des cycles consécutifs de démagnétisation thermique, de

façon à déterminer le taux et les composants magnétiques caractéristiques de chaque tesson. La magnétisation a été mesurée au moyen d'un magnétomètre spinner AGICO JR-6. Les paliers de chauffe ont été définis à 40° C; chaque tesson a été chauffé selon deux cycles divergents déphasés de 20° C. Les 38 fragments ont été démagnétisés thermiquement en quatorze ou quinze étapes dans un four TSD-2 Schonstedt. Après chaque palier, la sensibilité magnétique a été mesurée afin d'évaluer les éventuelles variations minéralogiques dues au chauffage.

#### **Porosimétrie à l'Hg**

Cette méthode d'analyse a été mise en œuvre sur des échantillons de céramique à recuire d'un centimètre cube environ. Parmi les 39 échantillons, 16 ont fait l'objet de mesures. Ces dernières portaient sur des échantillons parfaitement secs et ont été réalisées au moyen d'un porosimètre Micrometrics ATOPORE II 9215, capable de mesurer une porosité ouverte située entre 0,03 et 360 μm.

654 Friedman 1958.

655 Eramo 2006c.

## Glossaire/Glossar/Glossary

Pour les définitions de termes spécifiques, nous avons consultés les sites internet suivants :

Euro Dico verrier : <http://www.idverre.net>  
 Glass dictionary du Corning Museum : <http://www.cmog.org>  
 ainsi que Pierre Larousse, Grand dictionnaire universel du XIX<sup>e</sup> siècle, Paris, 1876.

Pour la traduction des termes nous sommes redevables aux relectures et amendements de plusieurs spécialistes du verre : Ingrid Berg et Peter Steppuhn pour l'allemand, Hugh Willmott pour l'anglais. Qu'ils en soient chaleureusement remerciés.

Terme	Définition	Terme allemand	Terme anglais
ailette	Voir four à ailettes	Flügel	wing
arche	En verrerie, terme général désignant un four annexe (arche à pots, arche à fritte, arche à recuire), en principe attenante au four de fusion, qui récupère la chaleur de ce dernier. Usage fréquent comme synonyme d' <i>arche à recuire</i> .	Nebenofen	secondary oven
arche à pots	Four établi dans une des annexes du four à ailettes servant à chauffer, <i>attremper</i> , les creusets avant de les installer dans le four de fusion.	Temperofen	pot arch
arche à recuire	Four servant à la recuisson des objets en verre immédiatement après leur fabrication. En général, elle est reliée au four de fusion par un conduit ( <i>lunette</i> ) ménagé au pied de la voûte. On trouve aussi arche à recuit ou tunnel de recuisson dans l'industrie moderne.	Kühlofen	annealing oven
attrempage	Du verbe attremper ; cuisson très progressive d'un creuset jusqu'à obtenir une température élevée. On parle aussi d'attrempage des fours pour désigner leur mise en température.	Tempern des Glashafens	pot arching
attremper	Cuire progressivement un creuset. Voir <i>attrempage</i> .		



Terme	Définition	Terme allemand	Terme anglais
banc de verrier	Siège sans dossier muni de deux bras latéraux qui permettent de faire rouler la canne sur un plan horizontal. Les bras ont pris le nom de <i>bardelles</i> , dont ils perpétuent la fonction.	Glasmacherstuhl, Glasmacherbank	glasmaker's chair
banquette	Partie du four qui flanque le foyer et sur laquelle reposent les <i>creusets</i> . Synonyme : siège, banc.	Hafenbank	siege
bardelles	Planchettes de bois étroites que les verriers attachaient sur leurs cuisses avant l'invention du <i>banc de verrier</i> .	Seitenlehne	chair arm
boudine	Voir <i>cive</i>		
brique réfractaire	Brique, dont les propriétés physiques et chimiques offrent une forte inertie thermique et une résistance particulièrement élevée à la chaleur. La silice, l'alumine, la chaux et la magnésie sont les composés minéraux classiques des briques réfractaires.	Schamottestein	refractory brick
calcin	Voir <i>groisil</i> .		
calcination	Opération qui modifie la structure d'un corps par une exposition à haute température.	Kalzination, Ausglühen	calcination
canal de chauffe	Canal étroit et souvent traversant qui accueille le combustible destiné au <i>tisage</i> du <i>four de fusion</i> .	Feuerungskanal, Schürkanal	fire-trench, stoke-tunnel
canne à souffler	Tige creuse en fer, longue d'un mètre soixante environ, servant à <i>cueiller</i> et à souffler la <i>paraison</i> . C'est l'outil principal du verrier.	Glasmacherpfeife	blowpipe, blowing iron
casson	Voir <i>groisil</i> .		
cendre	Résidu de la combustion d'éléments organiques, en particulier du bois. La cendre peut servir de <i>fondant</i> .	Asche, Holzasche	ash, wood ash

Terme	Définition	Terme allemand	Terme anglais
cive	Petite vitre circulaire (env. 10 cm de diamètre) obtenue par soufflage et rotation. Les cives sont fixées au moyen de baguettes de plomb sur un châssis en bois. Vitrage traditionnel en région germanique encore jusqu'au début du 19 <sup>e</sup> siècle.	Butzenscheibe, Butzenglas	crown (of glass)
claveau	Élément architectural taillé de plan trapézoïdal servant à la réalisation de voûtes.	Keilstein	key-stone
composition	Mélange des différentes matières premières qui, par fusion, se transforment en verre ou en cristal.	Gemenge, Glassatz	batch
cordeline	Tige de fer pleine avec laquelle on prend le verre pour former le cordon du goulot des bouteilles ; par extension, désigne aussi ce fil de verre chaud appliqué sous le goulot de certaines bouteilles.	Heisser Glasfaden	hot glass wire hot wire
creuset	Pot en terre réfractaire placé dans le <i>four de fusion</i> pour y fondre le verre.	Hafen, Glashafen,	crucible, melting pot
cueillage	Opération consistant à prélever du verre en fusion à l'aide d'une <i>canne</i> , d'un <i>ferret</i> ou d'une louche. Voir <i>cueiller</i> .	Aufnehmen des Glaspostens	gathering
cueiller	Prélever du verre en fusion. Voir <i>cueillage</i> .	Glas aufnehmen	gather
déshydroxylation	Mécanisme physique qui, par échauffement, provoque la perte de l'eau structurale d'un minéral hydraté et provoque sa décomposition.	Dehydratisierung	dehydroxylation
empontillage	Action d'empontiller, c'est-à-dire de reprendre un objet au pontil.	Anheftung	process to attach to the pontil
empontiller	Reprendre un objet au <i>pontil</i> .	anheften	put on the punty, attach the punty, stick the punty

Terme	Définition	Terme allemand	Terme anglais
étenderie	Installation servant à étendre le verre plat obtenu à partir de manchons. Par commodité nous assignons ce terme au bâtiment abritant ces installations spécifiques. Aujourd'hui, cette expression définit plutôt un four-tunnel assurant la recuisson en continu de grandes plaques de verre plat.	Streckhütte, Streckhaus	flattening house
étendre	Dans la fabrication du <i>verre plat</i> , action d'étaler, d'aplanir au polissoir de bois ou d'acier le cylindre de verre préalablement fendu, afin d'obtenir une feuille uniforme.	strecken	flatten
fer à fendre	Tige de fer pleine appliquée à chaud sur les <i>manchons</i> de verre afin d'en amorcer la fente.	Trenneisen	cutting iron
ferret	Voir <i>pontil</i> .		
fonceau	En verrerie, planche de bois sur laquelle le potier réalise un creuset.	Holzbrett	wooden board
fondant	Élément de la composition permettant d'abaisser la température de fusion du verre. Les principaux composants utilisés sont la soude et la potasse, apportés sous forme de carbonates.	Schmelzmittel, Netzwerkwandler (Natrium- und Kaliumkarbonat)	flux, melting agent (sodium and potassium carbonate)
four à ailettes	Four de fusion rectangulaire ou ovale auquel sont rattachés des fours annexes en forme d'ailettes reliés à la fournaise par des conduits de chauffe. Four probablement d'origine lorraine.	Glasschmelzofen mit flügelartig angebauten Nebenöfen, Flügelofen	winged furnace
four de fusion	Four principal en forme de coupole servant à la fusion de la composition vitrifiable. Aussi appelé four à pots, four réverbère ou fournaise (populaire).	Schmelzofen, Hauptofen	melting furnace,
four à étendre	Four qui, dans la production de <i>verre plat</i> , sert à étendre le cylindre de verre.	Streckofen	flattening oven

Terme	Définition	Terme allemand	Terme anglais
four de frittage	Four de taille réduite destiné à griller (fritter) la <i>composition</i> . Dans les <i>fours à ailettes</i> , ce four occupe parfois une des ailettes.	Frittofen	fritting oven
four à recuire	Voir <i>arche à recuire</i>		
Four réverbère	Voir <i>four de fusion</i>		
foyer-canal	Voir <i>canal de chauffe</i>		
fritte	Matière partiellement vitrifiée obtenue par grillage (chauffage) dans un four ou une <i>arche</i> spécifique.	Fritte	frit
fritter	Chauffer fortement une matière, en particulier un minéral ou une composition (en verrerie) sur une sole de four. Voir <i>fritte</i> .	fritten	fritting
gamin	Dans une verrerie, jeune garçon (souvent un enfant) occupé à des tâches subalternes : porter à l'arche, ouvrir et fermer les moules.	Kind, Helfer	boy
glaie	Espace voûté, qui, dans le four de fusion à ailettes, est situé entre les arches à recuire ou à pots et forme l'aire de tassage.	Schürplatz, grosses Schürgewölbe	stoking area
grésoir	Instrument de vitrier muni de deux encoches servant à rogner ( <i>gruger</i> ) les bords de plaques de verre. Dans l' <i>Encyclopédie</i> de Diderot et d'Alembert, on trouve le terme grugeoir.	Kröseleisen	grozing iron
groisil	Débris de verre récupérés ou collectés pour être refondus. L'adjonction de groisil dans une <i>composition</i> en accélère la fusion et réduit la consommation de combustible. Aussi appelé calcin.	Glasscherben, Glasstück	cullet
gruger	Action de rogner un verre en détachant des esquilles au moyen d'un outil spécifique, le <i>grésoir</i> .	kröseln	score opening, cracking-off



Terme	Définition	Terme allemand	Terme anglais
halle	Vaste bâtiment abritant les fours où se déroule le travail à chaud. C'est l'élément central d'une verrerie.	Glashütte	glasshouse
houppier	Ensemble des branches qui forment la frondaison d'un arbre.	Baumkrone	tree crown
liquidus	Pour un matériau affecté par un processus de fusion, le point de liquidus est le point qui sépare le domaine où le matériau est totalement fondu du domaine où coexistent un liquide et du solide.	Liquidus-Temperatur	liquidus temperature
lixiviation	Technique d'extraction de produits solubles par dissolution. Dans le cas de la cendre, la lixiviation permet d'éliminer les impuretés, puis par évaporation du liquide obtenu (lixiviat) de mobiliser les sels alcalins recherchés.	auslaugen	lixiviation, extracting
lunette	Conduit qui, depuis la fournaise, alimente les <i>arches</i> en chaleur.	Fuchs, Heizkanal	flue
maclage	Opération qui consiste à brasser le verre contenu dans le <i>creuset</i> , afin de le rendre homogène.	bülwern	blocking, poling, plugging
mailloche	Outil hémisphérique creux en bois, maintenu humide, dans lequel le verrier uniformise et arrondit la <i>paraison</i> avant soufflage.	Walkholz	wood block
manchon	Voir verre au manchon.		
marbre	Plaque métallique ou pierre lisse sur laquelle le verrier aplanit et répartit de façon homogène la <i>paraison</i> de verre avant de la souffler.	Wälzplatte, Marbel	marver
marbrage	Principe de faire rouler la <i>paraison</i> de verre sur une surface parfaitement plane, le <i>marbre</i> , avant soufflage.	marbeln, wälzen	rolling process on the marver

Terme	Définition	Terme allemand	Terme anglais
meule	Restes de verre qui adhèrent au <i>mors</i> , soit l'extrémité de la canne une fois l'objet en verre détaché.	Pfeifenabschlag	moil
mors	Extrémité de la <i>canne</i> que le verrier plonge dans le verre en fusion.	Pfeifenmündung	blowpipe end
ouvreau	Ouverture pratiquée dans la partie inférieure de la voûte du <i>four de fusion</i> qui garantit l'accès au contenu du <i>creuset</i> . Le nombre d'ouvreaux correspond à celui des creusets ; il est étroitement lié au type de production et en comprend entre quatre et douze.	Arbeitsöffnung	gathering hole, glory hole
paraison	Quantité de verre en fusion que le verrier prélève dans le <i>creuset</i> à l'aide d'une <i>canne</i> ou d'un <i>ferret</i> .	Kölbel, Glasposten	gather, paraison, parison
pilot	Tige de fer pleine dont une extrémité est renflée, servant à mélanger le verre en fusion, à l'écrémer, et potentiellement à piler le <i>groisil</i> .	Mörser	mortar
pince à pointe	Outil à ressort formé de deux branches dont les extrémités sont pointues, servant à façonner le verre.	Zange	jacks, tweezers
pince à fleur	Outil à ressort formé de deux branches dont les extrémités sont munies de palettes portant un motif floral en relief, servant à imprimer ce décor sur le verre chaud. Appelée plus généralement pince à motif.	Zange	crimp
place	Terme définissant à la fois l'équipe de verriers associée à un <i>ouvreau</i> et l'espace qu'elle occupe.	Platz, Arbeitsplatz	work place
polissoir	Outil de verrier en bois ou en acier muni d'un long manche servant à étendre le <i>manchon</i> de verre, afin d'obtenir une feuille plane. Synonyme : rabot.	Bügelholz, Streckkrücke, Glättkrücke	polishing tool

Terme	Définition	Terme allemand	Terme anglais
pontil	Tige de fer pleine qui, munie d'une petite quantité de verre en fusion à une extrémité, sert à reprendre un objet soufflé pour le travailler. Synonyme : <i>ferret</i> .	Hefteisen	pontil, punty
porosimétrie	Technique de mesure qui permet de déterminer la taille des pores et leur distribution au sein d'un corps solide.	Porositätmessung	porosimetry
pyrotechnologie	Terme générique désignant la technologie du feu.	Feuertechnologie	pyrotechnology
râble	Outil à long manche terminé par un petit râteau, qui sert à remuer des matières en fusion ou à nettoyer des fours.	Krücke	stirring-tool
réaction métasomatique	Processus diagénétique ou métamorphique qui, dans une roche, voit le remplacement de certains minéraux par d'autres.	Metasomatische Reaktion	metasomatic reaction
recuisson	Opération qui consiste à refroidir le verre lentement immédiatement après sa production, afin de réduire ses tensions.	Herunterkühlung eines heissen Glasobjektes	annealing
silice	Le dioxyde de silicium $\text{SiO}_2$ entre pour 60 à 75 % dans la <i>composition</i> du verre. On trouve la silice sous différentes formes dans des sables, des grès ou des roches métamorphiques ; le quartz est presque exclusivement composé de silice.	Kieselerde	silica
siège	Voir <i>banquette</i> .		
sintérisation	La sintérisation est la formation durant la cuisson de ponts intergranulaires qui permettent, par exemple, à la céramique de devenir résistante mécaniquement.	Sinterung	sintering
tisage	Chauffage du four dans une verrerie.	Feuerung	stoke
tisard	Dans un four, ouverture servant à l'introduction du combustible. Egalement partie postérieure du foyer par laquelle s'effectue son nettoyage.	Feuerungsloch, Schürloch	stoke hole

Terme	Définition	Terme allemand	Terme anglais
tisonnier	Ouvrier chargé d'entretenir le feu. Appelé aussi tiseur.	Schürer, Heizer	stocker
tuilette	Epaisse plaque de terre cuite percée d'un trou de préhension qui permet de réduire ou d'obturer l' <i>ouvreau</i> .	Ofenlochverschluss	glass furnace door
tonnelle	Arcade formant le <i>tisard</i> aménagée dans le corps de maçonnerie du <i>four de fusion</i> et par laquelle on introduit en général les <i>creusets</i> et le combustible.	Gewölbte Brennkammertür	furnace door
verre à jambe	Verre à boire dont le pied creux est soufflé-moulé, souvent en forme de balustre.	Kelchglas mit hohlem Schaft	goblet with baluster stem
verre à tige	Verre à boire dont le pied est plein, parfois mouluré.	Kelchglas mit massivem Schaft	goblet with full-stem
verre à pied refoulé	Verre à boire réalisé en une seule paraison et dont la base repoussée à l'intérieur forme le pied.	Kelchglas mit gestochenem Fuss	goblet with a pedestal or folded foot
verre en calotte	Terme que nous attribuons à une plaque de verre circulaire tirée d'une <i>paraison</i> soufflée aplatie. Elle présente en général un bord redressé qui est éliminé par grugeage ou découpage. A la différence de la <i>cive</i> , elle ne présente ni trace de <i>pontil</i> , ni bord rabattu.	Tellerscheibe	glass disc
verre plat	Verre d'épaisseur régulière produit par soufflage, étirage ou coulage.	Flachglas	flat glass
verre au manchon	Procédé de fabrication du verre plat à partir d'un cylindre de verre (manchon) qui est refendu, puis porté à l'arche à étendre.	Zylinderglas, Walzenglas	cylinder glass
verre fili-grané	Verre produit selon un procédé complexe inventé à Murano (IT) dans la 1ère moitié du 16 <sup>e</sup> siècle, qui permet d'intégrer des filaments blanc ou de couleur dans le corps d'un objet en verre généralement incolore. Les fils peuvent être spirales ou croisés.	Filigranglas	filigree glass



Terme	Définition	Terme allemand	Terme anglais
voûte	Ouvrage de maçonnerie cintré, formé d'éléments appuyés les uns contre les autres. Un canal de chauffe peut être fermé par une voûte. Dans un <i>four de fusion</i> , la voûte garantit une meilleure réfraction de la chaleur. Synonyme : coupole.	Gewölbe	vault

# Bibliographie

## Liste des abréviations

ADB: Archäologischer Dienst des Kantons Bern  
 SAB: Service archéologique du canton de Berne  
 AAEB: Archives de l'ancien évêché de Bâle  
 échant.: échantillon  
 s.d.: sans date  
 o. J.: ohne Jahr  
 o. O. u. J.: ohne Ort und Jahr

## Agricola 1556/1992

Georgius Agricola, *De re metallica*. Trad. par Albert France-Lanord. 2<sup>e</sup> édition. 1556/1992, Thionville.

## Aitchison 1981

John Aitchison, New approach to null correlations of proportions. *Mathematical Geology* 13, 1981, 175–189.

## Aitchison 1982

John Aitchison, The statistical analysis of compositional data (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society B* 44, 1982, 139–177.

## Aitchison 1983

John Aitchison, Principal component analysis of compositional data. *Biometrika* 70, 1983, 57–65.

## Aitchison 1984

John Aitchison, The statistical analysis of geochemical compositions. *Mathematical Geology* 16/6, 1984, 531–564.

## Aitchison 1986/2003

John Aitchison, The statistical analysis of compositional data. Monographs on statistics and applied probability. London 1986/2003, Reprint (with additional material) Caldwell.

## Aitchison 1999

John Aitchison, Logratios and natural laws in compositional data analysis. *Mathematical Geology* 31/5, 1999, 563–580.

## Aitchison 2008

John Aitchison, The single principle of compositional data analysis, continuing fallacies, confusions and misunderstandings and some suggested remedies. In: J. Daunis i Estadella and J. A. Martín-Fernández (eds.), *Proceedings of CoDa-Work'08, The 3<sup>rd</sup> Compositional Data Analysis Workshop* (May 27–30, University of Girona). Girona 2008.  
 ISBN: 978-84-8458-272-4.  
<http://hdl.handle.net/10256/706>

## Aitchison/Greenacre 2002

John Aitchison and Michael Greenacre, Biplots for compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society Series C* 51, 2002, 375–392.

## Aitchison/Barceló-Vidal/Pawlowsky-Glahn 2002

John Aitchison, Carles Barceló-Vidal and Vera Pawlowsky-Glahn, Some comments on compositional data analysis in archaeometry, in particular the fallacies in Tangri and Wright's dismissal of logratio analysis. *Archaeometry* 44/2, 2002, 295–304.

## Allut 1791

Antoine Allut, Art de la verrerie. In: Charles-Joseph Panckoucke (dir.), *Encyclopédie méthodique ou par ordre des matières. Arts et métiers mécaniques*. Volume 8. Paris 1791, 421–553.

## Amrein 2001

Heidi Amrein, L'atelier de verriers d'Avenches. L'artisanat du verre au milieu du 1<sup>er</sup> siècle après J.-C. *Cahiers d'archéologie romande* 87. Lausanne 2001.

## Amrein/Wolf 2010

Heidi Amrein und Sophie Wolf, Naturwissenschaftliche Untersuchungen an eisenzeitlichen Glasperlen. In: Tori Luca et al., *La necropoli di Giubiasco (TI) Vol. III: Le tombe dell'età del Bronzo, della prima età del Ferro e del La Tène antico e medio. La sintesi*. Collectio archaeologica 8. Zürich 2010, 74–80.

## Aramaki/Roy 1962

Shigeo Aramaki and Rustum Roy, Revised phase diagram for the system SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of the American Ceramic Society* 45, 1962, 229–242.

## Baart 2002

Jan M. Baart, The *façon de Venise* glass of Amsterdam. In: Johan Veeckman et al., *Majolica and Glass from Italy to Antwerp and beyond*. Antwerpen 2002, 161–172.

## Barbe 1993

Noël Barbe, *Hommes du verre. Les verriers de La Rochère*. Besançon 1993.

## Barrera/Velde 1989

Jorge Barrera and Bruce Velde, A study of French medieval glass composition. *Archéologie médiévale* 19, 1989, 81–130.

## Bastenaire-Daudenart 1825

F. Bastenaire-Daudenart, *L'art de la vitrification*. Paris 1825.

## Baumgartner 1995

Erwin Baumgartner, *Verre de Venise et façon de Venise*. Genève 1995.

## Baumgartner/Krueger 1988

Erwin Baumgartner und Ingeborg Krueger, *Phönix aus Sand und Asche. Glas des Mittelalters*. München 1988.

## Baxter/Beardah/Freestone 2005

Michael J. Baxter, Christian C. Beardah and Ian C. Freestone, Compositional analysis of archaeological glasses. In: Conference paper, *CoDa-Work'05, Session 4: Other fields of application*. University of Girona. Girona 2005.

## Baxter/Freestone 2006

Michael J. Baxter and Ian C. Freestone, Log-ratio compositional data analysis in archaeometry. *Archaeometry* 48/3, 511–531.  
 doi: 10.1111/j.1475-4754.2006.00270.x

## Bélet-Gonda/Évéquoz/Eramo 2007

Cécile Bélet-Gonda, Emmanuelle Évéquoz et Giacomo Eramo, Découverte d'une verrerie du XIX<sup>e</sup> siècle: Rebeuvelier (Jura, CH). In: Cécile Bélet-Gonda et al., *Premières Journées Archéologiques Frontalières de l'Arc Jurassien*. Mandeure, sa campagne et ses relations d'Avenche à Luxeuil et d'Augst à Besançon. *Actualités archéologiques régionales. Annales Littéraires de l'Université de Franche-Comté/Cahiers d'archéologie jurassienne*. 2007, 311–320.

## Bellanger 1988

Jacqueline Bellanger, *Verre d'usage et de prestige, France 1500-1800*. Paris 1988.

## Benrath 1875

Hermann E. Benrath, *Die Glasfabrikation*. Braunschweig 1875.

## Bergmann et al. 2008

Rudolf Bergmann et al., *Studien zur Glasproduktion seit dem 12. Jahrhundert im östlichen Westfalen*. Münster 2008.

## Bezborodov 1975

Michail A. Bezborodov, *Chemie und Technologie der antiken und mittelalterlichen Gläser*. Mainz 1975.

## Biringuccio 1540/1977

Vannoccio Biringuccio, *De la pirotechnia*. A cura di Adriano Carugo. Milano 1977.

## Bontemps 1868

Georges Bontemps, *Guide du verrier. Traité historique et pratique de la fabrication des verres, cristaux, vitraux*. Paris 1868.

## Bosc d'Antic 1780

Paul Bosc d'Antic, *Oeuvres*. Paris 1780.

## Boschetti-Maradi 2006

Adriano Boschetti-Maradi, *Gefässkeramik und Hafnerei in der Frühen Neuzeit im Kanton Bern*. Schriften des Bernischen Historischen Museums 8. Bern 2006.

## Bray 2003

Charles Bray, *Dictionary of Glass: Materials and techniques*. 2<sup>nd</sup> edition. London 2003.

*Brill 1999*

Robert H. Brill, Chemical analysis of early glass. Volume 1: Catalogue of samples. New York 1999.

*Brinker/Schüssler 2003*

Bernhard Brinker und Ulrich Schüssler, Spätmittelalterliche Glasproduktion im Schönbuch bei Tübingen. In: Peter Steppuhn, Glashütten im Gespräch. Berichte und Materialien vom 2. Internationalen Symposium zur archäologischen Erforschung mittelalterlicher und frühneuzeitlicher Glashütten Europas. Lübeck 2003, 39–45.

*Brombacher 2010*

Christoph Brombacher, Botanische Makrorestuntersuchungen aus der Glashütte von Court, Pâturage de l'Envers. In: Christophe Gerber, Court, Pâturage de l'Envers: une verrerie forestière jurassienne du début du 18<sup>e</sup> siècle. Volume 1: Les vestiges. Berne 2010, 156–164.

*Brumm 2003*

Véronique Brumm, Un Pays de verre et de cristal: les Vosges du Nord au siècle des Lumières. Strasbourg 2003.

*Cable 1998*

Michael Cable, The operation of wood fired glass melting furnaces. In: Patrick McCray and W. David Kingery, Prehistory and history of glass-making technology. Ceramics and civilization 8. Westerville 1998.

*Cable/Smedley 1987*

Michael Cable and James W. Smedley, Liquidus temperatures and melting characteristics of some early container glasses. Glass technology 28, 1987, 94–98.

*Černá 1995*

Eva Černá, Eine mittelalterliche Glashütte bei Pockau im Erzgebirge. Arbeits- und Forschungsberichte zur Sächsischen Bodendenkmalpflege 37, 1995, 177–194.

*Chapelot/Chapelot/Rieth 2009*

Jean Chapelot, Odette Chapelot et Bénédicte Rieth, Terres cuites architecturales médiévales et modernes. Caen 2009.

*Charleston 1978*

Robert J. Charleston, Glass furnaces through the ages. Journal of Glass Studies 20, 1978, 9–33.

*Chayes 1960*

Felix Chayes, On correlations between variables of constant sum. Journal of Geophysical Research 65/12, 1960, 4185–4193. doi:10.1029/JZ065i012p04185

*Chopinnet (à paraître)*

Marie-Hélène Chopinet, Chimie industrielle et innovations dans la compositions verrières, fin XVIII<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècle. In: Les innovations verrières et leur devenir, Actes du deuxième colloque international de l'association Verre & Histoire (Nancy, 26–28 mars 2009). Les cahiers de Verre & Histoire 2. Paris (à paraître), <http://www.verre-histoire.org/colloques/innovations>.

*Citlová/Woitsch 2012*

Zuzana Citlová and Jiří Woitsch, Potash – a key raw material of glass batch for Bohemian glasses from 14<sup>th</sup>–17<sup>th</sup> centuries? Journal of Archaeological Science 39, 2012, 371–380.

*Cioni et al. 2004*

Raffaello Cioni et al., Temperatures of the AD79 pyroclastic density current deposits (Vesuvius, Italy). Journal of Geophysical Research 109, 2004.

*Comas-Cufi/Thió-Henestrosa 2011*

Marc Comas-Cufi and Santiago Thió-Henestrosa, CoDaPack 2.0: a stand-alone, multiplatform compositional software. In: Juan José Egozcue, Raimon Tolosana-Delgado and M. I. Ortego (eds.), CoDaWork'11: 4<sup>th</sup> International Workshop on Compositional data analysis (Sant Feliu de Guíxols 2011). <http://ima.udg.edu/codapack/>

*Cool/Jackson/Monaghan 1999*

H. E. M. Cool, Caroline M. Jackson and Jason Monaghan, Glass-making and the sixth legion at York. Britannia 30, 1999, 147–162.

*Crossley 2009*

David Crossley, An outline of the manufacture of broad Glass in England. In: Sophie Lagabrielle et Michel Philippe (dir.), Verre et fenêtre de l'Antiquité au Moyen Age. Actes du premier colloque international de l'association Verre & Histoire (Paris-La Défense/Versailles, 13–15 octobre 2005). Les cahiers de Verre & Histoire 1. Paris 2009, 193–197.

*Crossley 1983*

David W. Crossley, The development of English glass furnaces in the sixteenth and seventeenth centuries. Journal of Glass Studies 25, 1983, 147–153.

*Descœudres/Horat/Stöckli 1985*

Georges Descœudres, Heinz Horat und Werner Stöckli, Glashütten des 18. Jahrhunderts im Entlebuch. Jahrbuch der historischen Gesellschaft Luzern 3, 1985, 2–45.

*Dettling 1922*

Alois Dettling, Die Glasfabrikation im Kanton Schwyz. Unteriberg 1922.

*Diderot/D'Alembert 1765a*

Paupoire. In: Denis Diderot et Jean D'Alembert (dir.), Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers. Volume 12. Neuchâtel (Paris) 1765, 207.

*Diderot/D'Alembert 1765b*

Potasse. In: Denis Diderot et Jean D'Alembert (dir.), Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers. Volume 13. Neuchâtel (Paris) 1765, 178–180.

*Diderot/D'Alembert 1765c*

Verrerie. In: Denis Diderot et Jean D'Alembert (dir.), Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers. Volume 17. Neuchâtel (Paris) 1765, 102–156.

*Diderot/D'Alembert 1772/2002*

Denis Diderot et Jean D'Alembert (dir.), Recueil de planches sur les sciences, les arts libéraux et les arts mécaniques avec leur explication. Art du verre. Fabrication des glaces. Paris 1772/2002, Réimpr. Tours.

*Dietrich 1789*

Philippe-Frédéric de Dietrich, Description des gîtes de minerais, forges, salines, verreries, tréfileries, fabriques de fer-blanc, porcelaine, faïence, etc. de la Haute et Basse-Alsace. Troisième et quatrième parties. Paris 1789.

*Dreier 1989*

Franz Adrian Dreier, Venezianische Gläser und «Façon de Venise». Berlin 1989.

*Dreier 2010*

Franz Adrian Dreier, Die Verbreitung der Glashütten «Façon de Venise» in Europa vor und nach dem Dreissigjährigen Krieg. Pressglas-Korrespondenz 3, 2010, 237–247.

*Dubler 1975*

Anne-Marie Dubler, Masse und Gewichte im Staat Luzern und in der alten Eidgenossenschaft. Luzern 1975.

*Egozcue 2006*

Juan José Egozcue, Simplicial geometry for compositional data. In: A. Buccianti, G. Mateu-Figueras and V. Pawłowsky-Glahn (eds.), Compositional data analysis in the Geosciences: From theory to practice. Geological Society Special Publications 264. London 2006, 145–159. doi: 10.1144/GSL.SP.2006.264.01.01

*Egozcue 2009*

Juan José Egozcue, Reply to “On the harker variation diagrams” by J. A. Cortés. Mathematical Geosciences 41/7, 829–834. doi: 10.1007/s11004-009-9238-0

*Egozcue et al. 2003*

Juan José Egozcue et al., Isometric logratio transformations for compositional data analysis. Mathematical Geology 35/3, 2003, 279–300.

*Eramo 2005a*

Giacomo Eramo, The melting furnace of the Derrière Sairoche glassworks (Court, Swiss Jura): heat-induced mineralogical transformations and their technological significance. Archaeometry 47/3, 2005, 571–592.

*Eramo 2005b*

Giacomo Eramo, Pre-industrial glassmaking in Switzerland: archaeometrical study on the glass-melting furnaces and the crucibles of the glassworks of Derrière Sairoche (Ct. Bern, 1699–1714) and Südel (Ct. Luzern, 1723–1741). Thèse de doctorat. Université de Fribourg 2005.

*Eramo 2006a*

Giacomo Eramo, The glass-melting crucibles of derrière Sairoche (1699–1714 AD, Ct. Bern, Switzerland): a petrological approach. *Journal of Archaeological Science* 33/3, 2006, 440–452.

*Eramo 2006b*

Giacomo Eramo, The glass-melting furnace and the crucibles of Südel (1723–1741, Switzerland): provenance of the raw materials and new evidence of high thermal performances. *Journal of Cultural Heritage* 7/4, 2006, 286–300.

*Eramo 2006c*

Giacomo Eramo, Pre-industrial glass-making in Switzerland: archaeometrical study of the glass-melting furnaces and the crucibles of the glassworks of Derrière Sairoche (Ct. Bern, 1699–1714) and Südel (Ct. Luzern, 1723–1741). *Plinius* 32, 2006, 1–4.

*Eramo 2006d*

Giacomo Eramo, Pre-industrial glassmaking in Swiss Jura: the refractory earth for the glassworks of Derrière sairoche (ct. Bern 1699–1714). In: Marino Maggetti and Bruno Messiga, *Geomaterials in cultural heritage*. Geological Society Special Publication 257. London 2006, 187–199.

*Filzmoser/Hron 2011*

Peter Filzmoser and Karel Hron, Robust statistical analysis. In: Vera Pawlowsky-Glahn and Antonella Buccianti (eds.), *Compositional data analysis*. Chichester 2011, 59–72.

*Filzmoser/Hron/Templ 2009*

Peter Filzmoser, Karel Hron and Matthias Templ, Discriminant analysis for compositional data and robust parameter estimation. Technical Report SM-2009-3 2009, 17. Department of Statistics and Probability Theory, Vienna University of Technology. Vienna 2009.  
<http://www.statistik.tuwien.ac.at/forschung/SM/SM-2009-3.pdf>

*Fleury 1909*

Ernest Fleury, Le sidérolithique suisse. Contribution à la connaissance des phénomènes d'altération superficielle des sédiments. *Mémoires de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles. Géologie et géographie* VI. Fribourg 1909.

*Fontenelle/Malepeyre 1854*

Julia de Fontenelle et F. Malepeyre, Nouveau manuel complet du verrier et du fabricant de glaces, cristaux, pierres précieuses factices, verres colorés, yeux artificiels, etc. Volume 1. Paris 1854.

*Fontenelle/Malpeyre 1898/1978*

Julia de Fontenelle et F. Malpeyre, Nouveau manuel complet du verrier et du fabricant de glaces, cristaux, pierres précieuses factices, verres colorés, yeux artificiels, etc. Ouvrage entièrement refondu par H. Bertran. Volume 1. Paris 1898/1978, Réimpr. Paris.

*Fossati/Mannoni 1975*

Severino Fossati e Tiziano Mannoni, Lo scavo della vetreria medievale di Monte Lecco. *Archaeologia Medievale* 2, 1975, 31–96.

*Foy 1989*

Danièle Foy, Le verre médiéval et son artisanat en France méditerranéenne. Paris 1989.

*Foy 2000*

Danièle Foy, Technologie, géographie, économie. Les ateliers de verriers primaires et secondaires en Occident : esquisse d'une évolution de l'Antiquité au Moyen Age. In: Marie-Dominique Nenna, *La Route du verre. Ateliers primaires et secondaires du second millénaire av. J.-C. au Moyen Age. Travaux de la Maison de l'Orient méditerranéen* 33. Lyon 2000, 146–170.

*Foy/Nenna 2001*

Danièle Foy et Marie-Dominique Nenna, Tout feu tout sable. Mille ans de verre antique dans le Midi de la France. Marseille 2001.

*Foy/Sennequier 1989*

Danièle Foy et Geneviève Sennequier, A travers le verre du Moyen Age à la Renaissance. Rouen 1989.

*Foy/Averous/Bourrel 1983*

Danièle Foy, Jean-Claude Averous et Bernard Bourrel, Peyremoutou: Une verrerie du XVII<sup>e</sup> siècle dans la Montagne Noire. *Archéologie du Midi Médiéval* 1, 1983, 93–103.

*Foy/Picon/Vichy 2000*

Danièle Foy, Maurice Picon et Michèle Vichy, Les matières premières du verre et la question des produits semi-finis. Antiquité et Moyen Age. In: Pierre Pétrequin et al., *Arts du feu et productions artisanales. Actes des XX<sup>e</sup> rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*. Antibes 2000, 419–432.

*Frank 1982*

Susan Frank, *Glass and Archaeology*. London 1982.

*Franze 2008*

Lothar Franze, Johann Kunckels «Cristallinen-Hütte» auf dem Hakendamm in Potsdam – Glascherbenfunde aus dem Hüttenabfall. In: Helmut Flachenecker, Gerrit Himmelsbach und Peter Steppuhn, *Glashüttenlandschaft Europa*. Beiträge zum 3. internationalen Glassymposium. Historische Studien der Universität Würzburg 8. Regensburg 2008, 148–152.

*Freestone/Gorin-Rosen 1999*

Ian C. Freestone and Yael Gorin-Rosen, The great glass slab at Bet She'arim, Israel: An early islamic glassmaking experiment? *Journal of Glass Studies* 41, 1999, 106–116.

*Freestone/Hughes/Stapleton 2008*

Ian C. Freestone, Michael I. Hughes and Colleen P. Stapleton, The composition and production of anglo-saxon glass. In: Vera I. Evison, *Catalogue of anglo-saxon glass in the British Museum*. British Museum Research Publication 167. London 2008, 29–46.

*Frêne 1993/94*

Théophile Rémy Frêne, Journal de ma vie. Volume 5: documentation. Porrentruy/Bienne 1993/94.

*Frey 2011*

Jonathan Frey, Die Kühlkeramik der Glashütte Court, Pâturage de l'Envers (1699–1714). Ein Werkstattbericht. In: Sabine Schmiedt Felgenhauer, Nikolaus Hofer und Karin Kühtreiber, *Keramik und Technik. Internationale Fachtagung der Österreichischen Gesellschaft für Mittelalterarchäologie, zugleich 43. Internationales Symposium zur Keramikforschung des Arbeitskreises für Keramikforschung (Mautern an der Donau, 20. bis 25. September 2010)*. Beiträge zur Mittelalterarchäologie in Österreich 27. Wien 2011, 205–215.

*Frey (à paraître)*

Jonathan Frey, Court, Pâturage de l'Envers : une verrerie forestière jurassienne du début du 18<sup>e</sup> siècle. Volume 3: Die Kühl- und Haushaltskeramik. Berne (à paraître).

*Frisius 1668*

Andreas Frisius, *De arte vitraria*. Amsterdam 1668.

*Frommer/Kottmann 2004*

Sören Frommer und Aline Kottmann, Die Glashütte Glaswasen im Schönbuch. Produktionsprozesse, Infrastruktur und Arbeitsalltag eines spätmittelalterlichen Betriebs. *Tübinger Forschungen zur historischen Archäologie* 1. Büchenbach 2004.

*Geiger 1948*

Thomas Geiger, Manganerze in den Radiolariten Graubündens. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie 27, 1948.

*Geilmann/Brückbauer 1954*

Wilhelm Geilmann und Theo Brückbauer, Beiträge zur Kenntnis alter Gläser II. Der Manganerhalt alter Gläser. *Glastechnische Berichte* 27/12, 1954, 456–459.

*Gerber 2003*

Christophe Gerber, Court-Chaluet bei Moutier (Berner Jura, Schweiz): eine Schwarzwälder Glashütte? In: Peter Steppuhn, *Glashütten im Gespräch*. Berichte und Materialien vom 2. Internationalen Symposium zur archäologischen Erforschung mittelalterlicher und frühneuzeitlicher Glashütten Europas. Lübeck 2003, 63–69.



*Gerber 2009*

Christophe Gerber, Production de cives et de manchons dans le Jura central suisse au début du XVIII<sup>e</sup> siècle. L'exemple de la verrerie de Court-Chaluet. In: Sophie Lagabrielle et Philippe Michel (dir.), Verre et fenêtre de l'Antiquité au Moyen Age. Actes du premier colloque international de l'association Verre & Histoire (Paris-La Défense/Versailles, 13-15 octobre 2005). Les cahiers de Verre & Histoire 1. Paris 2009, 187-192.

*Gerber 2010*

Christophe Gerber, Court, Pâturage de l'Envers: une verrerie forestière jurassienne du début du 18<sup>e</sup> siècle. Volume 1: Les vestiges. Berne 2010.

*Gerber et al. (à paraître)*

Christophe Gerber et al., Court, Pâturage de l'Envers: une verrerie forestière jurassienne du début du 18<sup>e</sup> siècle. Volume 4. Berne (à paraître).

*Gerber/Portmann/Kündig 2002*

Christophe Gerber, Martin Portmann et Christian Kündig, Fours à chaux, four à fer et charbonnières dans le Jura bernois. Vestiges archéologiques médiévaux et modernes découverts entre Moutier et Roches sur le tracé de l'autoroute A16, 1995-1997. Berne 2002.

*Glatz 1991*

Regula Glatz, Hohlglasfunde der Region Biel. Zur Glasproduktion im Jura. Bern 1991.

*Goll 1984*

Jürg Goll, Kleine Ziegelgeschichte. Zur Einordnung der Ziegelfunde aus der Grabung St. Urban. Jahresbericht der Stiftung Ziegelei-Museum 2, 1984, 29-102.

*Goll 2002*

Jürg Goll, Backsteine. Bericht der Stiftung Ziegelei-Museum 19, 2002, 9-28.

*Grandjean 1989*

Marcel Grandjean, Un jalon essentiel de l'architecture de brique piémontaise: l'oeuvre d'Humbert le bâtard au château de Cheneau à Estavayer (1433-1443). In: Agostino Paravicini Bagliani et Jean-François Poudret, La Maison de Savoie et le Pays de Vaud. 1989, 163-180.

*Grandjean 1995*

Marcel Grandjean, Le château de Vufflens (vers 1415-vers 1430). Notes sur sa construction, son esthétique et sa valeur défensive. Revue d'Art et d'Archéologie 52/2, 1995, 89-136.

*Gratuze 1994*

Bernard Gratuze, Le verre: les éléments de réponses que peuvent proposer les méthodes de caractérisation physico-chimiques aux problématiques archéologiques posées par ce matériau. Revue d'Archéométrie 18, 1994, 75-87.

*Greenacre 2010*

Michael Greenacre, Log-ratio analysis is a limiting case of correspondence analysis. Mathematical Geosciences 42/1, 129-134. doi: 10.1007/s11004-008-9212-2

*Greenacre 2011*

Michael Greenacre, Compositional data and correspondence analysis. In: Vera Pawlowsky-Glahn and Antonella Buccianti (eds.), Compositional data analysis. Chichester 2011, 104-113.

*Greenacre/Lewi 2009*

Michael Greenacre and Paul Lewi, Distributional equivalence and subcompositional coherence in the analysis of compositional data, contingency tables and ratio-scale measurements. Journal of Classification 26/1, 29-54. doi: 10.1007/s00357-009-9027-y

*Grossmann 1934*

Heinrich Grossmann, Glasindustrie in der Schweiz. Schweizer Industrieblatt 19-20, 1934, 249-259.

*Grossmann 1967*

Heinrich Grossmann, Influence des métiers et des activités industrielles sur la forêt suisse de 1600 à 1860. In: Actes du colloque sur la forêt (Besançon 21-22 octobre 1966). Cahiers d'études comtoises 12. Besançon 1967, 159-164.

*Grote 1996*

Michèle Grote, Les tuiles anciennes du canton de Vaud. Cahiers d'archéologie romande 67, 1996, 7-64.

*Grote 1999*

Michèle Grote, Evolution de la recherche sur les tuiles anciennes du canton de Vaud. Etudes de Lettres 1/3-4, 1999, 113-124.

*Hammer 2004*

Peter Hammer, Das Sächsische Blaufarbenwesen und der Handel mit Kobaltfarben – nach Unterlagen der Bücherei der Bergakademie Freiberg. In: Cor. F. Winkler Prins and Stephen K. Donovan (dir.), Proceedings of the VII international, Cultural heritage in geosciences, mining and metallurgy; libraries, archives, museums: "Museum and their collections" held at the Nationaal Natuurhistorisch Museum Leiden (The Netherlands), 19-23 May, 2003. Scripta Geologica, Special Issue 4. Leiden 2004, 108-117.

*Haudicquer de Blancourt 1697/1718*

Jean Haudicquer de Blancourt, L'Art de la verrerie [...]. Nouvelle édition augmentée d'un traité des pierres précieuses. Volume 1. Paris 1697/1718.

*Henderson/McLoughlin/McPhail 2004*

Julian Henderson, Sean D. McLoughlin and David S. McPhail, Radical changes in islamic glass technology: evidence for conservatism and experimentation with new glass recipes from early and middle islamic Raqqa, Syria. Archaeometry 46, 2004, 439-468.

*Henrivaux 1883*

Henrivaux, Jules, Le verre et le cristal. In: Encyclopédie chimique (dir. M. Frémy), tome V, fasc. 5. Paris, 1883.

*Hoefler 1852*

Fernand (dir.) Hoefler, Nouvelle biographie universelle depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours. Volume 2. Paris 1852.

*Hofer et al. 2010*

Nikolaus Hofer et al., Handbuch zur Terminologie der mittelalterlichen und neuzeitlichen Keramik in Österreich. Fundberichte aus Österreich, Materialhefte Reihe A, Sonderheft 12. Wien 2010.

*Holbach 1752*

Paul Henri Thiry d'Holbach, Art de la verrerie de Neri, Merret et Kunckel. Paris 1752.

*Horat 1986*

Heinz Horat, Flühli-Glas. Suchen und Sammeln 9. Bern 1986.

*Horat 1991*

Heinz Horat, Der Glasschmelzofen des Priesters Theophilus. Bern 1991.

*Hume 1976*

Ivor Noël Hume, Archaeological excavations on the site of John Frederick Amelung's New Bremen Glassmanufactory 1962-1963. Journal of Glass Studies XVIII, 1976, 137-214.

*Israeli/Katsnelson 2006*

Yael Israeli and Natalya Katsnelson, Refuse of a glass workshop of the second Temple Period from Area. In: Hillel Geva, Jewish quarter excavations in the old city of Jerusalem, conducted by Nahman Avigad, 1969-1982. Volume III: Area E and Other Studies. Final Report. Jerusalem 2006, 411-460.

*Jackson/Smedley 2004*

Caroline M. Jackson and James W. Smedley, Medieval and post-medieval glass technology: melting characteristics of some glasses melted from vegetable ash and sand mixtures. Glass Technology 45/1, 2004, 36-42.

*Jackson et al. 1998*

Caroline M. Jackson et al., Biringuccio on 16<sup>th</sup> Century glassmaking. Annales du 14<sup>e</sup> congrès de l'Association Internationale pour l'Histoire du Verre (Venezia, Milano), 1998, 335-340.

*Jackson et al. 2003*

Caroline M. Jackson et al., Roman glass-making at Coppergate, York? Analytical evidence for the nature of production. Archaeometry 45, 2003, 453-456.

*Jahrbuch Wald und Holz 2002*

Bundesamt für Umwelt (Hrsg.), Jahrbuch Wald und Holz. Bern 2002.

*Jahrbuch Wald und Holz 2004*

Bundesamt für Umwelt (Hrsg.), Jahrbuch Wald und Holz. Bern 2004.

*Jahrbuch Wald und Holz 2006*

Bundesamt für Umwelt (Hrsg.), Jahrbuch Wald und Holz. Bern 2006.

*Jannin 1990*

François Jannin, Pairu-Les Bercettes. Verreries forestières des XIII-XIV<sup>e</sup> siècles. In: Jean-Olivier Guilhot, Stéphanie Jacquemot et Pierre Thion, Verrerie de l'est de la France, XII<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècles. Fabrication, Consommation. Revue Archéologique de l'Est et du Centre-Est, 9<sup>e</sup> Supplément. 1990, 247-274.

*Johannsen 1925*

Otto Johannsen, Biringuccios Pirotechnia. Ein Lehrbuch der chemisch-metallurgischen Technologie und des Artilleriewesens aus dem 16. Jahrhundert. Braunschweig 1925.

*Kaufmann 2010*

Verena Kaufmann, Archäologische Funde einer spätmittelalterlichen Glaserwerkstatt in Bad Windsheim. Handwerk, Handel und Geschichte. Bad Windsheim 2010.

*Keess 1822*

Stephan Edlem Von Kees (Hrsg.), Beschreibung der Fabricate, welche in den Fabriken, Manufakturen und Gewerben des österreichischen Kaiserstaates erzeugt werden. Band 2. Wien 1822.

*Keller 2006*

Christine Keller, Glas, Verwendung und Produktion von Glas ab dem Mittelalter. In: Historisches Lexikon der Schweiz 5. Basel 2006, 471-472.

*Kirn 1830*

Hüttenverwalter Kirn, Ueber den Betrieb der Hohl- und Fensterglashütten im Böhmer Waldgebirge, in den Vogesen und einigen Gegenden von Süddeutschland. In: Carl Johann Bernhard Karsen, Archiv für Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Hüttenkunde 2, 1830, 247-284.

*Kirn 1833*

Hüttenverwalter Kirn, Über die verschiedenen Methoden das Brennholz zur Glasofenfeuerung zu dörren, nebst einigen Worten über die Anwendung gedörrten Holzes in Eisenhochöfen und Frischherden. Journal für technische und ökonomische Chemie 16, 1833, 273-306.

*Krischner/Koppelhuber-Bitschnau 1994*

Harald Krischner und Brigitte Koppelhuber-Bitschnau, Röntgenstrukturanalyse und Rietveldmethode: Eine Einführung. Frankfurt 1994.

*Krünitz 1779*

Johann Georg Krünitz, Oekonomische Encyclopadie oder allgemeines System der Staats-, Stadt-, Haus- u. Landwirthschaft, in alphabetischer Ordnung. Band 18. Berlin 1779.

*Krünitz 1810*

Johann Georg Krünitz, Oekonomische Encyclopadie oder allgemeines System der Staats-, Stadt-, Haus- u. Landwirthschaft, in alphabetischer Ordnung. Band 116. Berlin 1810.

*Kucera/Malmgren 1998*

Michal Kucera and Björn A. Malmgren, Logratio transformation of compositional data – a resolution of the constant sum constraint. Marine Micropaleontology 34, 1998, 117-120.

*Kuisma-Kursula/Räisänen/Matiskainen 1997*

Piirko Kuisma-Kursula, Jyrki Räisänen and Heikki Matiskainen, Chemical analyses of European forest glass. Journal of Glass Studies 39, 1997, 57-68.

*Kunckel 1679/1975a*

Johann Kunckel, Ars vitraria experimentalis oder vollkommene Glasmacher-Kunst. Berlin 1679/1975, Nachdruck Leipzig.

*Kunckel 1679/1975b*

Johann Kunckel, Artis Vitrariae experimentalis. Pars secunda oder zweiter Theil der vollständigen Glasmacher-Kunst. Berlin 1679/1975, Nachdruck Leipzig.

*Kurzmann 2004*

Peter Kurzmann, Mittelalterliche Glastechnologie. Archäologie, Schriftquellen, Archäochemie, Experimente. Frankfurt am Main 2004.

*Lambert 1972*

Nicole Lambert, La Seube: témoin de l'art du verre en France méridionale du Bas-Empire à la fin du Moyen-Age. Journal of Glass Studies 14, 1972, 77-116.

*Lambert 1982/83*

Nicole Lambert, La verrerie médiévale forestière de la Seube, Claret (Hérault). Archéologie en Languedoc 5, 1982/83, 177-244.

*Lang 2001*

Walter Lang, Spätmittelalterliche Glasproduktion im Nassachtal, Uhingen, Kreis Göppingen. Materialhefte zur Archäologie in Baden-Württemberg 59. Stuttgart 2001.

*Larousse 1867*

Pierre Larousse, Calcin. In: Grand dictionnaire universel du XIX<sup>e</sup> siècle. Volume 3. Paris 1867, 111.

*Larousse 1874*

Pierre Larousse, Potasse. In: Grand dictionnaire universel du XIX<sup>e</sup> siècle. Volume 12. Paris 1874, 1509-1511.

*Lazar/Willmott 2006*

Irena Lazar and Hugh Willmott, The glass from the Gnalić wreck. Annales Mediterranea. Koper 2006.

*Leiber 1990/91*

Christian Leiber, Hic officinae vitrariae. Die hoch- und spätmittelalterlichen Glashütten im Hils bei Grünenplan, Landkreis Holzminden. Die Kunde. Zeitschrift für Ur- und Frühgeschichte 41/42, 1990/91, 511-552.

*Leiber 2008*

Christian Leiber, Zur archäologischen Ausgrabung einer Glasmanufaktur in Holzen am Ith. In: Helmut Flachenecker, Gerrit Himmelsbach und Peter Steppuhn (Hrsg.), Glashüttenlandschaft Europa. Beiträge zum 3. internationalen Glassymposium in Heigenbrücken/Spessart. Regensburg 2008, 139-147.

*Leng 1835*

Heinrich Leng, Vollständiges Handbuch der Glasfabrikation nach allen ihren Haupt- und Nebenzweigen. Neuer Schauplatz der Künste und Handwerk 79. Weimar/Ilmenau 1835.

*Lima et al. 2012*

Augusta Lima et al., Chemical analysis of 17<sup>th</sup> century millefiori glasses excavated in the monastery of Sta. Clara-a-Velha, Portugal: comparison with Venetian and façon-de-Venise production. Journal of Archaeological Science 39, 2012, 1238-1248.

*Loibl 1996a*

Werner Loibl, Asche. In: Werner Loibl, Asche zu Glas. Die Flussmittel Asche, Pottasche und Soda in fränkischen Glashütten vom 17. bis 19. Jahrhundert. Lohr am Main 1996, 21-77.

*Loibl 1996b*

Werner Loibl, Pottasche. In: Werner Loibl, Asche zu Glas. Die Flussmittel Asche, Pottasche und Soda in fränkischen Glashütten vom 17. bis 19. Jahrhundert. Lohr am Main 1996, 79-156.

*Loibl 2003*

Werner Loibl, Zur Terminologie des historischen Flachglas. In: Peter Steppuhn, Glashütten im Gespräch. Berichte und Materialien vom 2. Internationalen Symposium zur archäologischen Erforschung mittelalterlicher und frühneuzeitlicher Glashütten Europas. Lübeck 2003, 103-107.

*Loysel 1799/1800*

Jean-Baptiste Loysel, Essai sur l'art de la verrerie. Paris An 8 (1799).

*Lynggaard 1975*

Finn Lynggaard, La verrerie artisanale. Paris 1975.

*Maggetti 1982*

Marino Maggetti, Phase analysis and its significance for technology and origin. In: J. S. Olin and A. D. Franklin, Archaeological Ceramics. Washington 1982, 121-133.

*Månsson/Johannsen 1941*

Peder Månsson und Otto Johannsen, Peder Månssons Schriften über technische Chemie und Hüttenwesen. Eine Quelle zur Geschichte der Technik des Mittelalters. Schriftenreihe der Arbeitsgemeinschaft für Technikgeschichte des Vereines Deutscher Ingenieure im NSBDT. Band 16. Berlin 1941.

*Martín-Fernández/Palarea-Albaladejo/Olea 2011*  
Josep Antoni Martín-Fernández, Javier Palarea-Albaladejo and Ricardo Antonio Olea, Dealing with Zeros. In: Vera Pawlowsky-Glahn and Antonella Buccianti (eds.), *Compositional data analysis*. Chichester 2011, 43–58.

*Martin 2010*

Elizabeth A. Martin, *A dictionary of science*. Oxford Paperback Reference (ed.). Oxford 2010.

*Mathesius 1562*

Johannes Mathesius, *Sarepta oder Bergpostill samt der Jochimsthalischen kurtzen Chroniken*. Nürnberg 1562.

*Maurer 1999*

Christine Maurer, *Die Backsteinwerkstücke des Zisterziensklosters St. Urban. Kunstgeschichtliche Untersuchung zu Produktion und Formgebung einer mittelalterlichen Ziegelei*. Dissertation. Universität Stuttgart 1999.

*Maus/Jenisch 1997/98*

Hans Josef Maus und Bertram Jenisch, *Schwarzwälder Waldglas. Glashütten, Rohmaterial und Produkte der Glasmacherei vom 12.–19. Jahrhundert*. Alemannisches Jahrbuch, 1997/98, 325–524.

*Mendera 1991*

Marja Mendera, *La production du verre médiéval en Toscane: les fouilles d'une verrerie à Gernagana (Gambassi-Florence)*. In: Danièle Foy, *Ateliers de verriers de l'Antiquité à la période pré-industrielle. Actes des 4<sup>èmes</sup> Rencontres. Association Française pour l'Archéologie du Verre* (Rouen 24–25 novembre 1989). Rouen 1991, 89–102.

*Merrett 1662/2006*

Christopher Merrett, *The art of glass*. London 1662/2006, Reprint Sheffield.

*Messiga/Riccardi 2001*

Bruno Messiga and Maria Pia Riccardi, *A petrological approach to the study of ancient glass*. *Petrologico di mineralogia* 70, 2001, 57–70.

*Michaud 1843*

Louis-Gabriel Michaud (dir.), *Biographie universelle ancienne et moderne: histoire par ordre alphabétique de la vie publique et privée de tous les hommes*. Volume 1. Paris 1843.

*Michel 1989*

Guy-Jean Michel, *Verriers et verreries en Franche-Comté au XVIII<sup>e</sup> siècle*. Collection Recherches. Vesoul 1989.

*Monbaron/Gobat/Le Tensorer 1998*

Michel Monbaron, Jean-Michel Gobat et Jean-Marie Le Tensorer, *Paysage calcaire de l'arc jurassien: du minéral au vivant. Contributions au symposium principal de la 177<sup>e</sup> assemblée de l'ASSN (La Chaux-de-fonds, 10 octobre 1997)*. Cahier du Musée d'histoire naturelle 7. La Chaux-de-Fonds 1998.

*Moretti/Hreglich (à paraître)*

Cesare Moretti et Sandro Hreglich, *Les verres opaques: la technologie des verriers vénitiens (XV<sup>e</sup>-XX<sup>e</sup> siècle)*. In: *Les innovations verrières et leur devenir, Actes du deuxième colloque international de l'association Verre & Histoire* (Nancy, 26–28 mars 2009). Les cahiers de Verre & Histoire 2. Paris (à paraître), <http://www.verre-histoire.org/colloques/innovations>.

*Morey/Kracek/Bowen 1930*

G. W. Morey, F. C. Kracek and N. L. Bowen, *The ternary system K<sub>2</sub>O-CaO-SiO<sub>2</sub>*. *Journal of the Society of Glass Technology* 14, 1930, 149–187.

*Moser 1969*

Ludwig Moser, *Badisches Glas, seine Hütten und Werkstätten. Veröffentlichungen zur Geschichte des Glases und der Glashütten in Deutschland* 1. Wiesbaden 1969.

*Nenna/Picon/Vichy 2000*

Marie-Dominique Nenna, Maurice Picon et Michèle Vichy, *Ateliers primaires et secondaires en Egypte à l'époque gréco-romaine*. *Travaux de la Maison de l'Orient méditerranéen* 33, 2000, 97–112.

*Nenna/Vichy/Picon 1997*

Marie-Dominique Nenna, Michèle Vichy et Maurice Picon, *L'atelier de verrier de Lyon du I<sup>er</sup> siècle après J.-C. et l'origine des verres «romains»*. *Revue d'archéométrie* 21, 1997, 81–87.

*Nenna et al. 2005*

Marie-Dominique Nenna et al., *Ateliers primaires du Wadi Natrun: nouvelles découvertes*. *Annales du 16<sup>e</sup> congrès de l'Association Internationale pour l'Histoire du Verre* (Londres 2003), 2005, 59–63.

*Neri 1612/1980*

Antonio Neri, *L'arte vetraria*. A cura di Rosa Bavrover. Milano 1980.

*Niggli/De Quervain/Winterhalter 1930*

Paul Niggli, Paul De Quervain und Robert U. Winterhalter, *Chemismus schweizerischer Gesteine*. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie 14, 1930.

*Nurni 1997*

Juha Nurni, *Heating values of mature trees*. *Acta Forestalia Fennica* 256, 1997, 28.

*Pawlowsky-Glahn/Egozcue 2006*

Vera Pawlowsky-Glahn and Juan José Egozcue, *Compositional data and their analysis: An introduction*. In: A. Buccianti, G. Mateu-Figueras and V. Pawlowsky-Glahn (eds.), *Compositional data analysis in the geosciences: From theory to practice*. Geological Society Special Publications 264. London 2006, 1–10.  
doi: 10.1144/GSL.SP.2006.264.01.01

*Pawlowsky-Glahn/Olea 2004*

Vera Pawlowsky-Glahn and Ricardo A. Olea, *Geostatistical analysis of compositional data*. International Association for Mathematical Geology. *Studies in Mathematical Geology* 7. New York 2004.

*Pawlowsky-Glahn/Buccianti 2011*

Vera Pawlowsky-Glahn and Antonella Buccianti (eds.), *Compositional data analysis*. Chichester 2011.

*Pearson 1897*

Karl Pearson, *Mathematical contributions to the theory of evolution. On a form of spurious correlation which may arise when indices are used in the measurement of organs*. *Proceedings of the Royal Society of London* 60 (359–367), 1897, 489–498.

*Péligot 1862*

Eugène Melchior Péligot, *Douze leçons sur l'art de la verrerie*. Paris 1862.

*Péligot 1877*

Eugène Melchior Péligot, *Le verre, son histoire, sa fabrication*. Paris 1877.

*Pfeiffer/Oberhänsli/Epprecht 1988*

Hans-Rudolf Pfeiffer, Heidi Oberhänsli and Wilfried Epprecht, *Geochemical evidence for a synsedimentary hydrothermal origin of jurassic iron-manganese deposits at Gonzen (Sargans, Helvetic Alps, Switzerland)*. *Marine Geology* 84, 1988, 257–272.

*Pfirter 1997*

Urs Pfirter, *Atlas géologique de la Suisse*. Feuille 1106 Moutier. Notice explicative. Berne 1997.

*Pfirter et al. 1996*

Urs Pfirter et al., *Atlas géologique de la Suisse*. Feuille 1106 Moutier, carte 96. Berne 1996.

*Pfirter et al. 1997*

Urs Pfirter et al., *Feuille 1106 Moutier, carte 96*. In: *Atlas géologique de la Suisse 1:25 000*. Service géologique national. Berne 1997.

*Philippe 1998*

Michel Philippe, *Naissance de la verrerie moderne XII<sup>e</sup>-XVI<sup>e</sup> siècles. Aspects économiques, techniques et humains*. Collection de Travaux de l'Académie Internationale d'Histoire des Sciences 38. Turnhout 1998.

*Philippe 2009*

Michel Philippe, *Ampleur et diversité de la production du verre plat dans le royaume de France*. In: Sophie Lagabrielle et Michel Philippe (dir.), *Verre et fenêtre de l'Antiquité au Moyen Age*. Actes du premier colloque international de l'association Verre & Histoire (Paris-La Défense/Versailles, 13–15 octobre 2005). *Les Cahiers de Verre & Histoire* 1. Paris 2009, 81–85.

*Piganiol 1965*

Pierre Piganiol, *Le verre, son histoire, sa technique*. Paris 1965.

*Poole/Gensamer 1949*

James-P. Poole and Maxwell Gensamer, Systematic study of effect of oxide constituents on viscosity of silicate glasses at annealing temperatures. *Journal of the American Ceramic Society* 32, 1949, 220–229.

*Potts 1992*

Philip J. Potts, *A handbook of silicate rock analysis*. Glasgow 1992.

*Pris 1975*

Claude Pris, *La manufacture royale des glaces de Saint-Gobain (1665-1830). Une grande entreprise sous l'Ancien Régime*. Thèse de doctorat. Université de Lille 1975.

*Quiquerez 1855*

Auguste Quiquerez, *Notice historique et statistique sur les mines, les forêts et les forges de l'ancien évêché de Bâle*. Berne 1855.

*Rais 1954*

André Rais, *Les deux verreries de Châlet. Les intrèts du Jura* 25/7, 1954, 137-150.

*Reade/Freestone/Bourke 2009*

Wendy Reade, Ian C. Freestone and St. Bourke, Innovation and continuity in Bronze and Iron Age glass from Pella in Jordan. *Annales du 17<sup>e</sup> congrès de l'Association Internationale pour l'Histoire du Verre* (Anvers 2006), 2009, 47-54.

*Reade/Freestone/Simpson 2005*

Wendy Reade, Ian C. Freestone and S. John Simpson, Innovation or continuity? Early first millennium BCE glass in the Near east: the cobalt blue glasses from Assyrian Nimrud. *Annales du 16<sup>e</sup> congrès de l'Association Internationale pour l'Histoire du Verre* (Londres, 7-13 Septembre 2003), 2005, 23-27.

*Rehder 2000*

J. E. Rehder, *The mastery and uses of fire in Antiquity*. Montréal 2000.

*Rehren 2000*

Thilo Rehren, Rationales in old world base glass compositions. *Journal of Archaeological Science* 27, 2000, 1225–1234.

*Rehren 2001*

Thilo Rehren, Aspects of the production of cobalt-blue glass in Egypt. *Archaeometry* 43, 2001, 483–489.

*Rehren/Pusch 1997*

Thilo Rehren and Edgar B. Pusch, New Kingdom glass-melting crucibles from Quantir-Pirameses. *Journal of Egyptian Archaeology* 83, 1997, 127–141.

*Rempel 2008*

Ursula Rempel, Die frühneuzeitliche Weinglashütte bei Wieda/Südharz. In: Helmut Flachen-ecker, Gerrit Himmelsbach und Peter Steppuhn, *Glashüttenlandschaft Europa. Beiträge zum 3. internationalen Glassymposium. Historische Studien der Universität Würzburg* 8. Regensburg 2008, 192–196.

*Ricke 1978*

Helmut Ricke, Lampengeblasenes Glas des Historismus. Die Hamburger Werkstatt C.H.F. Müller. *Journal of Glass Studies* 20, 1978, 45–69.

*Riff 1960*

Adolphe Riff, *La verrerie de Wildenstein (Haut-Rhin) 1700-1884. Art populaire de la France de l'Est*, 1960, 195-208.

*Rose-Villequey 1970*

Germaine Rose-Villequey, *Verre et verriers de Lorraine au début des Temps Modernes*. Université de Paris 4, 1970.

*Roussel 2009*

Christine Roussel, L'usage du verre à vitre en Franche-Comté aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles. In: Sophie Lagabrielle et Philippe Michel (dir.), *Verre et fenêtre de l'Antiquité au Moyen Age. Actes du premier colloque international de l'association Verre & Histoire* (Paris-La Défense/Versailles, 13-15 octobre 2005). *Les Cahiers de Verre & Histoire* 1. Paris 2009, 177-186.

*Ryser et al. 2000*

Frieder Ryser et al., *Glanzlichter. Die Kunst der Hinterglasmalerei/Reflets enchanteurs. La peinture sous verre*. Schweizerischer Forschungszentrum zur Glasmalerei Romont/Centre suisse de recherche sur le vitrail Romont. Bern 2000.

*Schenk 1981*

Paul Schenk, Die Glashütte im Schangnau und ihre Besitzer. *Berner Zeitschrift für Geschichte und Heimatkunde* 43/4, 1981, 109–121.

*Schlick-Nolte/Werthmann 2010*

Birgit Schlick-Nolte and Rainer Werthmann, More glass beakers for Nesikhons: A preliminary report. *Journal of Glass Studies* 52, 2010, 235–240.

*Schlumbaum 2010*

Angela Schlumbaum, Die frühneuzeitlichen Hölzer von Court, Pâturage de l'Envers: Glaserei (1699–1714), Meilerplätze (ca. 1760–1860) und Holzkohleflöcken (ca. 1700–1800). In: Christophe Gerber, *Court, Pâturage de l'Envers : une verrerie forestière jurassienne du début du 18<sup>e</sup> siècle. Volume 1 : les vestiges*. Berne 2010, 165-171.

*Schmid/Stern 1976*

Elisabeth Schmid und Willem B. Stern, Artefakte aus obsidianartigem Gestein vom Kilimandscharo, Tansania. *Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel* 85/1–2, 1976, 154–159.

*Schwab 1927*

Fernand Schwab, *Die industrielle Entwicklung des Kantons Solothurn und ihr Einfluss auf die Volkswirtschaft. Festschrift zum 50-jährigen Bestehen des solothurnischen Handels- und Industrievereins 1874/1924. IV. Lieferung*. Solothurn 1927.

*Schwab 1942*

Fernand Schwab, *Die Standorte der alten Glashütten und der von ihnen benützten Gruben von Quarzsand und Huppererde im Berner Jura. Zusammenestellt auf Grund eigener, noch unveröffentlichter Archivforschungen. Kriegs-, Industrie- und Arbeitsamt, Bergbaubureau. Bern*, 1. April 1942. Bern 1942.

*Schwab (o.J.)*

Fernand Schwab, *Geschichte der jurassischen Glashütte Esserdilles oder Biafond 1747–1792*. Typoscript. (o. O. u. J.).

*Searle 1953*

A. B. Searle, *Refractory materials. Their manufacture and use*. London 1953.

*Seiz 1979*

Robert Seiz, *Der Glaserfachbuch*. 4. Ausgabe. Schorndorf 1979.

*Shortland et al. 2011*

Andrew J. Shortland et al., The evaporitic deposits of lake Fazda (Wadi Natrun, Egypt) and their use in roman glass production. *Archaeometry* 53/5, 2011, 916–929.

*Shugar/Rehren 2002*

Aaron Shugar and Thilo Rehren, Formation and composition of glass as a function of firing temperature. *Glass Technology* 43/C, 2002, 145–150.

*Silvestri/Longinelli/Molin 2010*

Alberta Silvestri, Antonio Longinelli and Gianmario Molin,  $\delta^{18}\text{O}$  measurements of archaeological glass (Roman to Modern age) and raw materials: possible interpretation. *Journal of Archaeological Science* 37, 2010, 549–560.

*Smedley/Jackson 2002*

J. W. Smedley and C. M. Jackson, Medieval and post-medieval glass technology: review of bracken in glassmaking. *Glass Technology* 43/C, 2002, 221–224.

*Smirniou/Rehren 2011*

Melina Smirniou and Thilo Rehren, Direct evidence of primary glass production in Late Bronze Age Amarna, Egypt. *Archaeometry* 53, 2011, 58–80.

*Stephan 1986*

Hans-Georg Stephan, Grossalmerode. Ein Zentrum der Herstellung von technischer Keramik, Steinzeug und Irdengut aus Hessen. Die Geschichte der keramischen Gewerbe in Grossalmerode und die Entwicklung ihrer Produktion vom 12. zum 19. Jahrhundert, Teil 1. Grossalmerode 1986.



*Stephan 1988/89*

Hans-Georg Stephan, Archäologische Ausgrabungen im Bereich einer hochmittelalterlichen Waldglashütte im Bramwald, Gemeinde Niemental, Kreis Göttingen, Teil 1: Einführung und Befunde. Zeitschrift für Archäologie des Mittelalters 16/17, 1988/89, 123–154.

*Stephan 1997/98*

Hans-Georg Stephan, Die Glasschmelzgefäße der hochmittelalterlichen Waldglashütte Steimcke im Bramwald. Zeitschrift für Archäologie des Mittelalters 25/26, 1997/98, 107–140.

*Stephan 2003*

Hans-Georg Stephan, Glasschmelzhafengefäße. Grundzüge der Entwicklung von den Anfängen im Alten Orient bis zur Neuzeit. In: Peter Steppuhn, Glashütten im Gespräch. Berichte und Materialien vom 2. Internationalen Symposium zur archäologischen Erforschung mittelalterlicher und frühneuzeitlicher Glashütten Europas. Lübeck 2003, 136–162.

*Stephan 2008*

Hans-Georg Stephan, Glasmacherei im Solling – Neue fächerübergreifende archäologische Forschungen. Die Glashütte am Lakeborn. In: Helmut Flachenecker, Gerrit Himmelsbach und Peter Steppuhn (Hrsg.), Glashüttenlandschaft Europa. Beiträge zum 3. Internationalen Glassymposium in Heigenbrücken/Spessart. Regensburg 2008, 125–131.

*Stephan/Wedepohl/Hartmann 1992*

Hans-Georg Stephan, Karl Hans Wedepohl und Gerald Hartmann, Die Gläser der hochmittelalterlichen Waldglashütte Steimcke. Berichte über die Grabungsergebnisse. Teil 2: Chemische und formenkundliche Analysen der Gläser. Zeitschrift für Archäologie des Mittelalters 20, 1992, 89–123.

*Steppuhn 2002*

Peter Steppuhn, Der (un)getrübte Blick nach draussen. Zur Entwicklung des Glasfensters in Europa. In: Guido Helmig, Barbara Scholkmann und Matthias Untermann (eds.), Centre Region Periphery. Medieval Europe Basel 2002. 3<sup>rd</sup> International Conference of Medieval and Later Archaeology, Basel (Switzerland) 10.–15. September 2002. Band 1. Hertingen 2002, 371–378.

*Stern/Schlick-Nolte 1994*

E. Marianne Stern und Birgit Schlick-Nolte, Frühes Glas der alten Welt: 1600 v. Chr. – 50 n. Chr.: Sammlung Ernesto Wolf. Stuttgart 1994.

*Stern 1991*

Willem B. Stern, Zur chemischen Analyse der Bieler Gläser. In: Regula Glatz, Hohlglasfunde der Region Biel. Zur Glasproduktion im Jura. Bern 1991, 83–85.

*Stern 2001*

Willem B. Stern, XRF-analysis of geological standard materials: performance of “standardless” measuring routines for major and minor components. ICP Information Newsletter 27/3, 2001, 196–200.

*Stern 2002*

Willem B. Stern, Glasbereitung. Archäometrie-kurs Nr. 6407, SS 2002, Universität Basel. Unpubl. Skript, Basel 2002.

*Stern 2010*

Willem B. Stern, Stroh als Quelle erneuerbarer Energie. Swiss Bulletin für angewandte Geologie 15/1, 2010, 95–103.

*Stern/Gerber 2002*

Willem B. Stern und Yvonne Gerber, Bericht zur chemischen Analyse von Proben der Glashütte Chaluet-3, Pâturage de l’Envers, zuhanden des Archäologischen Dienstes des Kantons Bern (30. Juli 2002). Unpubl. Bericht, Basel 2002.

*Stern/Gerber 2004a*

Willem B. Stern und Yvonne Gerber, Bericht zur chemischen Analyse von Proben der Glashütte Chaluet-3, Pâturage de l’Envers, zu Handen des Archäologischen Dienstes des Kantons Bern. Unpubl. Bericht, Basel 2004.

*Stern/Gerber 2004b*

Willem B. Stern und Yvonne Gerber, Potassium-calcium glass: new data and experiments. Archaeometry 46/1, 2004, 137–156.

*Stern/Gerber 2009*

Willem B. Stern und Yvonne Gerber, Ancient potassium-calcium glass and its raw materials (wood-ash, fern-ash, potash) in Central Europe. Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaften beider Basel 11, 2009, 107–122.

*Stern/Gerber/Helmig 2002*

Willem B. Stern, Yvonne Gerber und Guido Helmig, Residues in medieval pottery from Basel. In: Guido Helmig, Barbara Scholkmann und Matthias Untermann (eds.), Centre Region Periphery. Medieval Europe Basel 2002. 3<sup>rd</sup> International Conference of Medieval and Later Archaeology, Basel (Switzerland) 10.–15. September 2002. Band 3. Hertingen 2002, 197–200.

*Steulet 1999*

Francis Steulet, Les derniers verriers. Intervalles. Revue culturelle du Jura bernois et de Bienne 53, 1999, 53–56.

*Strobl 1990*

Sebastian Strobl, Glastechnik des Mittelalters. Stuttgart 1990.

*Suana 1984*

Michael Suana, Die Manganerzlagerrstätten von Tinizong (Oberhalbstein, Graubünden). Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie 64, 1984.

*Tabor 1818*

Carl Wigand Tabor, Versuch einer ausführlichen Anleitung zur Glasmacherkunst. Zweyter oder praktischer Theil. Frankfurt am Main 1818.

*Tangri/Wright 1993*

D. Tangri and R. V. S. Wright, Multivariate analysis of compositional data: applied comparisons favour standard principal components analysis over Aitchison’s loglinear contrast method. Archaeometry 35/1, 1993, 103–112.

*Tanimoto/Rehren 2008*

Satoko Tanimoto and Thilo Rehren, Interactions between silicate and salt melts in LBA glassmaking. Journal of Archaeological Science 35, 2008, 2566–2573.

*Tarcsay 2008*

Kinga Tarcsay, Erster archäologischer Nachweis der Tellerglasherstellung des 17. Jahrhunderts in Ostösterreich. In: Helmut Flachenecker, Gerrit Himmelsbach und Peter Steppuhn (Hrsg.), Glashüttenlandschaft Europa. Beiträge zum 3. Internationalen Glassymposium in Heigenbrücken/Spessart. Regensburg 2008, 172–176.

*Tarcsay 2009*

Kinga Tarcsay, Frühneuzeitliche Glasproduktion in der Herrschaft Reichenau am Freiwald, Niederösterreich. Fundberichte aus Österreich. Materialhefte A 19. Horn 2009.

*Théophile c.1125/1843*

Théophile, Essai sur divers arts. Trad. par Charles de l’Escalopier. Paris 1843.

*Theophilus c.1125/1999*

Theophilus, Theophilus Presbyter und das Mittelalterliche Kunsthandwerk. Erhard Brepohl (Hrsg.). Band 1: Theophilus Presbyter: de diversis artibus. Über die verschiedenen Künste (und Handwerkstechniken). Köln 1999.

*Thierrin-Michael 2003*

Gisela Thierrin-Michael, Contribution des analyses chimiques, pétrographiques et minéralogiques. In: Ursule Babey, Produits céramiques modernes. Ensemble de Porrentruy, Grand’Fin. Cahier d’archéologie jurassienne 18. Porrentruy 2003, 121–136.

*Tillman 1978*

David A. Tillman, Wood as an energy resource. New York 1978.

*Tillman 1989*

David A. Tillman, Energy generation from wood. In: Arno Schniewind (ed.), Concise encyclopedia of wood & wood-based materials. Oxford 1989, 102–105.

*Tillman 1991*

David A. Tillman, The combustion of solid fuels and wastes. New York 1991.

*Tolosana-Delgado 2008*

Raimon Tolosana-Delgado, Compositional data analysis in a nutshell. Göttingen 2008. <http://www.sediment.uni-goettingen.de/sta&tolosana/extra/CoDaNutshell.pdf>

*Tolosana-Delgado/van den Boogaart 2011*

Raimon Tolosana-Delgado and Karl Gerald van den Boogaart, Linear models with compositions in R. In: Vera Pawlowsky-Glahn and Antonella Buccianti (eds.), *Compositional data analysis*. Chichester 2011, 356–372.

*Tschärner 1762*

Vincenz Bernhard Tschärner, Observations sur la situation et la culture de la Prévôté de Moutier-Grandval, dans l'Evêché de Basle. Mémoires et observations recueillies par la Société oeconomique de Berne 4, 1762, 137–173.

*Turner 1956a*

William Ernest Stephen Turner, Studies in ancient glasses and glassmaking processes. Part III. The chronology of the glassmaking constituents. *Journal of the Society of Glass Technology* 40, 1956, 39–52.

*Turner 1956b*

William Ernest Stephen Turner, Studies in ancient glasses and glassmelting processes. Part V. Raw materials and melting processes. *Journal of the Society of Glass Technology* 40, 1956, 277–300.

*Turner 1962*

William Ernest Stephen Turner, A notable British seventeenth-century contribution to the literature of glassmaking. *Glass Technology* 3/6, 1962, 201–213, Reprint in Merrett 2006.

*Tyler/Willmott 2005*

Kieron Tyler and Hugh Willmott, John Baker's late 17<sup>th</sup>-century glasshouse at Vauxhall. *Molas Monograph* 28. London 2005.

*Ullmann 1919*

Fritz Ullmann, *Enzyklopädie der technischen Chemie*. Band 6. Berlin 1919.

*Ullmann 1957*

Wilhelm Foerst (Hrsg.), *Ullmann's Enzyklopädie der technischen Chemie*, Band 8. Berlin 1957.

*Van den Boogaart/Tolosana-Delgado 2008*

Karl Gerald van den Boogaart and Raimon Tolosana-Delgado, "Compositions": A unified R package to analyze compositional data. *Computers and Geosciences* 34/4, 320–338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2006.11.017>

*Van den Boogaart/Tolosana-Delgado/Bren 2011*

Karl Gerald van den Boogaart, Raimon Tolosana-Delgado and Matevz Bren, *Compositions: Compositional data analysis*. R package version 1.10-2 (2011). <http://CRAN.R-project.org/package=compositions>, manual: Package 'compositions', February 14, 2012, Version 1.10-2. <http://www.cran.r-project.org/web/packages/compositions/compositions.pdf>

*Veckman 2002*

Johan Veckman, Production and consumption of glass in 16<sup>th</sup> and early 17<sup>th</sup> century Antwerp: the archaeological evidence. In: Johan Veckman et al., *Majolica and glass from Italy to Antwerp and beyond*. 2002, 79–94.

*Verità 1985*

Marco Verità, L'invenzione del cristallo muranese: una verifica analitica delle fonti storiche. *Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro* 1, 1985, 17–29.

*Verità 2007*

Marco Verità, Influence of the islamic tradition on the chemistry and technology of Venetian glass. In: *Venice and the islamic world*, exhibition in The Metropolitan Museum of Art. New York 2007, 276–279.

*Viard 2002*

Georges Viard, La manufacture de Glaces de Rouelles (Haute-Marne): un modèle pour l'Encyclopédie 33, 2002, 175–196.

*Von Saldern 2004*

Axel von Saldern, *Antikes Glas*. München 2004.

*Wamser 1984*

Ludwig Wamser, Glashütten im Spessart – Denkmäler früher Industriegeographie. In: Claus Grimm, Glück und Glas. Zur Kulturgeschichte des Spessartglases. München 1984, 25–33.

*Watzke 2004*

Berhard Watzke, Materialwissenschaftliche Untersuchungen von Produktionseinrichtungen und Produkten der spätmittelalterlichen Glashütte Schönbuch. In: Sören Frommer und Aline Kottman, *Die Glashütte Glaswasen im Schönbuch*, Anhang 12 auf CD. Büchenbach 2004.

*Wedepohl 1998*

Karl Hans Wedepohl, *Mittelalterliches Glas in Mitteleuropa: Zusammensetzung, Herstellung, Rohstoffe*. Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen II. Mathematisch-Physikalische Klasse 1. Göttingen 1998.

*Wedepohl 2001*

Karl Hans Wedepohl, The composition of glass from the carolingian and post-carolingian period in Central Europe. In: Francesca Dell'Acqua et Romano Silva (dir.), *La vetrata in Occidente dal IV all' XI secolo*. Atti delle giornate di studi, Lucca, 23-25 settembre 1999. Collana di studi sul colore 3. Lucca 2001, 257–270.

*Wedepohl 2003*

Karl Hans Wedepohl, *Glas in Antike und Mittelalter*, Geschichte eines Werkstoffs. Stuttgart 2003.

*Wegstein 1996*

Monika Maria Wegstein, Vergleichende chemische und technische Untersuchungen an frühneuzeitlichen Glashüttenfunden Nordhessens und Südniedersachsens. *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten*, Serie C. Mineralogie 15. Frankfurt am Main 1996.

*Wenigwieser 1992*

Sabine Wenigwieser, *Mineralogische Untersuchungen an den Evaporiten und Tonen des Wadi El-Natron (Nordwest-Aegypten)*. Dissertation. Universität Fridericiania Karlsruhe 1992.

*Whitehouse 2003*

David Whitehouse, Things that travelled: the surprising case of raw glass. *Early Medieval Europe* 12, 2003, 301–305.

*Wick 2010*

Lucia Wick, Die holozänen Waldveränderungen in der Region Court: Palynologische Untersuchungen. In: Christophe Gerber, *Court, Pâturage de l'Envers: une verrerie forestière jurassienne du début du 18<sup>e</sup> siècle*. Volume 1: Les vestiges. Berne 2010, 172–176.

*Wimmenauer 1985*

Wolfhard Wimmenauer, *Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine*. Stuttgart 1985.

*Wolf 1999*

Sophie Wolf, *The bricks from St. Urban: analytical and technical investigation on Cistercian bricks in Switzerland*. Dissertation. Universität de Fribourg 1999.

*Wolff 1871*

Emil Wolff, Aschen-Analysen von landwirthschaftlichen Produkten, Fabrik-Abfällen und wildwachsenden Pflanzen. Einheitlich berechnet und mit Nachweisung der Quellen systematisch geordnet. Berlin 1871.

*Woronoff 2009*

Denis Woronoff, Quand l'exception devient (presque) la règle: remarques sur le vitrage en France, XVI<sup>e</sup>-XVII<sup>e</sup> siècles. In: Sophie Lagabrielle et Philippe Michel (dir.), *Verre et fenêtre de l'Antiquité au Moyen Age*. Actes du premier colloque international de l'association Verre & Histoire (Paris-La Défense/Versailles, 13-15 octobre 2005). *Les cahiers de Verre & Histoire* 1. Paris 2009, 133–136.

*Zecchin 1987*

Luigi Zecchin, *Vetro e vetrai di Murano*. Studi sulla storia del vetro. Volume 1. Venezia 1987.

*Zecchin 1990*

Luigi Zecchin, *Vetro e vetrai di Murano*. Studi sulla storia del vetro. Volume 3. Venezia 1990.

*Žegklitz 2007*

Jaromir Žegklitz, *Renaissance glasswork in Broumy*. Studies in Post-Medieval Archaeology 2, 2007, 145–180.

*Zemp 1898*

Josef Zemp, *Die Backsteine von St. Urban*. In: *Festschrift zur Eröffnung des Landesmuseum Zürich am 25. Juni 1898*. Zürich 1898.

## Crédit iconographique

*Augustinermuseum, Freiburg im Bresgau*  
Fig. 199-200, 202.

*Bibliothèque Nationale Suisse, Service de digitalisation*  
Fig. 181, 193.

*Service archéologique du canton de Berne (SAB)*  
Markus Detmer, Daniel Marchand et Max Stöckli : Page de couverture  
Markus Detmer : P. 17  
Christophe Gerber : Fig. 11, 19-21, 27, 33, 36, 41, 48-49, 59, 62, 130, 156, 173, 191  
Laetitia Kaiser : Fig. 135, 180.  
Daniel Marchand : Fig. 1, 26, 28, 37, 45, 192, planche 12 (en partie), p. 163.  
Daniel Marchand et Marc Müller : Fig. 185.  
Daniel Marchand et Max Stöckli : P. 223  
Badri Redha : Fig. 4-6, 12-14, 16, 22-25, 30-31, 34-35, 38-39, 44, 45-47, 53, 55-56, 63-64, 68, 137-148, 155, 157-160, 162-172, 177-179, 183, 186. P. 37 et 95  
Badri Redha et Eliane Schranz : Fig. 149-152, 154.  
Cornelia Schlup : Fig. 18, 29, 46, 52, 54, 65-67, 73, 136, 161, 174, 184, 190.  
Cornelia Schlup et Anna Schmocker : Fig. 51, 57, 133.  
Cornelia Schlup, Anna Schmocker et Michèle Frey Bühler : Fig. 58.  
Cornelia Schlup et Max Stöckli : Fig. 193.  
Anna Schmocker : Fig. 8, 17, 42 et pl. 1-5.  
Eliane Schranz : Fig. 3, 7, 9-10, 15, 32, 40, 43, 60, 61, 156, pl. 6-11, 12 (en partie).  
Max Stöckli : Fig. 194-195 et 198 (base 3D Daniel Marchand).  
Nicolas Stork : P. 9

*Giacomo Eramo*  
Fig. 131-132, 134, 175-176, 187-189.

*Radoslaw Myszk*  
Fig. 153.

*Swisstopo autorisation JA100012*  
Fig. 2 (infographie Cornelia Schlup, SAB), 8 (infographie Anna Schmocker, SAB)

*Universität Basel, Mineralogisch-Petrographisches Institut, Labor für analytische Geochemie*  
Willem B. Stern: Abb. 69, 71, 73-74, 119-127.  
Yvonne Gerber: Abb. 70, 72, 75-118, 128-129, Annex 2.

*Universitetsbibliothek Uppsala, Suède*  
Fig. 197.

*Vitromusée, Romont FR*  
Fig. 50.

*Illustrations tirées d'ouvrages imprimés*  
Tarcsay 2009, Abb. 27 : Fig. 182.  
*Descoedres/Horat/Stöckli 1985, Abb. 9 :*  
Fig. 196.  
*Zecchin 1987, 151 :* Fig. 203.  
*Diderot/D'Alembert 1772/2002, Verrerie en bouteilles pl. VI,2 :* Fig. 204.

Illustration tirée de l'internet  
<http://www.lwl.org/pressemitteilungen/daten/bilder/22200.jpg>: Fig. 201.

## Adresses des auteurs

**Giacomo Eramo**

Università degli Studi di Bari  
Facoltà di Scienze  
I-70121 Bari  
giacomo.eram@geomin.uniba.it

**Jonathan Frey**

Aaraustrasse 130  
CH-4600 Olten  
jonathan.frey@erz.be.ch

**Christophe Gerber**

Service archéologique du canton de Berne  
Brünnenstrasse 66  
CH-3018 Bern  
christophe.gerber@erz.be.ch

**Yvonne Gerber**

Departement Altertumswissenschaften  
Klassische Archäologie  
Universität Basel  
Petersgraben 51  
CH-4051 Basel  
yvonne.gerber@unibas.ch

**Laetitia Kaiser**

Gesellschaftstrasse 40  
CH-3012 Bern  
laetitia.kaiser@gmail.com

**Chris Lucianu**

Universität Basel  
calx.stat@gmail.com

**Willem B. Stern**

Eulerstrasse 24  
Postfach  
CH-4003 Basel  
willem-b.stern@unibas.ch

**Lara Tremblay**

Service archéologique du canton de Berne  
Brünnenstrasse 66  
CH-3018 Bern  
lara.tremblay@erz.be.ch